



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

MILLA KORHONEN
UMPILÄHDEKAPSELEIDEN IKÄÄNTYMINEN TEOLLISUUDEN
SOVELLUKSISSA

Diplomityö

Tarkastajat:
professori Minnamari Vippola
associate professor Pasi Peura
Tarkastajat ja aihe hyväksytty
26. huhtikuuta 2017

TIIVISTELMÄ

MILLA KORHONEN: Umpilähdekapselien ikääntyminen teollisuuden sovelluksissa

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 81 sivua, 16 liitesivua

Toukokuu 2017

Materiaalitekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Metallimateriaalit

Tarkastajat: professori Minnamari Vippola, associate professor Pasi Peura

Avainsanat: umpilähdekapseli, tiiviys, korroosio, teollisuussovellukset

Umpilähde on säteilylähde, jossa radioaktiivinen aine on suljettu tiiviisti metallikapselin sisälle niin, ettei se pääse leviämään kapselin ulkopuolelle eikä sitä voi koskettaa. Umpilähteitä on paljon erilaisia, mutta tämä työ keskittyy ruostumattomiin teräskapseleihin kapseloituihin gammasäteilylähteisiin, joita käytetään teollisuuden sovelluksissa. Diplomityön tavoitteena oli selvittää umpilähdekapselin kestävyys ja käyttöikään vaikuttavat tekijät teollisuussovelluksissa ja antaa suosituksia suositellun käyttöikänsä ylittäneiden umpilähteiden valvontaan.

Umpilähteitä käytetään monenlaisissa teollisuuden sovelluksissa, kuten pinnankorkeus- ja tiheysmittareina. Ne ovat yleisesti käytettyjä ja Suomessakin niitä on käytössä useita tuhansia kappaleita. Yksi tärkeimmistä umpilähteisiin liittyvistä turvallisuustekijöistä on umpilähdekapselin tiiviys. Tämän työn teoriaosuudessa esitellään umpilähteiden rakennetta, materiaaleja ja yleisimpiä sovelluksia sekä niiden mekaanisia vaatimuksia ja tiiviyskokeita käsitteleviä standardeja. Työssä vertaillaan myös eri maiden viranomaisen säädöksiä ja vaatimuksia umpilähteisiin liittyen. Umpilähteiden kestävyys ja käyttöikä vaikuttavia tekijöitä esitellään kirjallisuusselvityksen pohjalta.

Työn kokeellisessa osuudessa tehtiin materiaalikarakterisointitutkimuksia AISI 316L- ja AISI 321 -teräslaaduista valmistetuille ”dummy”-umpilähdekapseleille. Tutkimukset sisälsivät näytekapseleiden kemiallisen koostumuksen ja mikrorakenteen määritykset, hitsisauman SEM-tutkimukset, raekokomääritykset, hitsisaumojen NDT-tutkimukset ja näytemateriaalien korroosionopeuden mittaukset. Pääasialliset eroavaisuudet liittyivät näytemateriaalien korroosiokäyttäytymiseen.

Kirjallisuusselvityksen ja kokeellisten tutkimusten perusteella tärkeimmiksi umpilähteiden kestävyys ja käyttöikä vaikuttaviksi tekijöiksi arvioitiin korroosio ja umpilähteiden käsittely. Tämän perusteella työn lopussa annetaan suosituksia suositellun käyttöikänsä ylittäneiden umpilähteiden valvontaan ja mahdollisten riskikohteiden tunnistamiseen säteilylähderekisterissä.

ABSTRACT

MILLA KORHONEN: Aging of sealed source capsules in industrial applications
Tampere University of Technology
Master of Science Thesis, 81 pages, 16 Appendix pages
May 2017
Master's Degree Programme in Materials Science
Major: Metallic materials
Examiners: Professor Minnamari Vippola, associate professor Pasi Peura

Keywords: sealed source capsule, leak tightness, corrosion, industrial applications

Sealed source is a radiation source that has radioactive substance capsuled inside a leak tight metal capsule. The sealed source capsule prevents touching the radioactive substance and dispersion of radioactive contamination outside the capsule. The variety of sealed sources is wide but this thesis focuses on gamma radiation sources encapsulated in stainless steel capsules and used in industrial applications. The goal of this thesis was to study the factors affecting the durability and working life of sealed source capsules in industrial applications and give recommendations on control of sealed sources that have passed their recommended working life.

Sealed sources are used in different kinds of industrial applications, for example in level controllers or thickness gauges. They are commonly used and there are several thousands of sealed sources in use in Finland. One of the most important safety factors regarding sealed sources is the leak tightness of the capsule. As a theory part, this thesis presents the structure and materials of sealed sources, the most common industrial applications and the standards regarding mechanical requirements of sealed sources and leakage test methods. It also compares regulations and control of sealed sources by authorities in different countries. Different factors affecting the durability and working life of sealed sources in industrial environments are also presented.

Material characterization study of dummy sealed source capsules was done to compare AISI 316L and AISI 321 grades of stainless steel as capsule materials. The study consisted of definition of chemical compositions and microstructures of the samples, SEM-study of the weld zones, grain size definitions, NDT-analysis of the weld seams and corrosion rate measurements. Main differences between these samples were found in corrosion behavior.

The most important factors affecting the durability and working life of sealed sources were evaluated to be corrosion and handling of the sealed sources. Based on this evaluation some recommendations were given on how to improve control of sealed sources that have passed the recommended working life given to them by the sealed source manufacturer.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on kirjoitettu Säteilyturvakeskuksen Säteilyn käyttö teollisuudessa – yksikössä elokuun 2016 ja huhtikuun 2017 välisenä aikana. Työn tarkastajina ovat toimineet professori Minnamari Vippola ja associate professor Pasi Peura. Työn ohjaajana Säteilyturvakeskuksella toimi DI Santtu Hellstén.

Työn aihepiiri oli erittäin kiinnostava, ajankohtainen ja haastava. Toivonkin, että työstä on hyötyä sen lukijoille ja erityisesti TEO-yksikölle. Kiitän työn tarkastajia professori Vippolaa ja associate professor Peuraa kaikista neuvoista, vastauksista ja kommenteista, joita he antoivat työn kirjoituksen aikana. Kiitos heille erityisesti nopeista reagoinneista kysymyksiini vastatessa. Kiitän ohjaajaani Santtua vapaudesta ja vastuusta työn sisällön ja työn etenemisen suhteen, hyvästä ohjauksesta sekä mielenkiintoisen haasteen tarjoamisesta. Suuri kiitos myös TEO-yksikön työkavereilleni kannustuksesta, kiinnostuksesta, mukavasta työilmapiiristä ja sopivasta määrästä virkistystoimintaa diplomityön ohella.

Opiskeluvuodet TTY:llä olisivat olleet hyvin erinäköisiä ilman opiskelukavereita, ystäviä ja perhettä. Kiitokset Tampereen teekkareille mahtavasta yhteisöstä, menosta ja meiningistä sekä teekkarihengestä. Erityiskiitos TTYYH14:lle.

Helsingissä, 19.4.2017

Milla Korhonen

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	UMPILÄHTEET	3
2.1	Rakenne ja materiaalit	3
2.1.1	Radioaktiivinen aine	3
2.1.2	Kapseli	5
2.1.3	Säteilysuojus	8
2.2	Yleisimpiä sovelluksia	9
2.2.1	Pintakytkin ja pinnankorkeusmittari	10
2.2.2	Tiheysmittari	12
2.2.3	Kuljetinvaaka	12
3.	UMPILÄHDESTANDARDIT	14
3.1	ISO 2919: Radiation protection – Sealed radioactive sources – General requirements and classification.....	14
3.2	ISO 9978: Radiation protection – Sealed radioactive sources – Leakage test methods.....	16
4.	UMPILÄHTEIDEN IKÄÄNTYMISEEN LIITTYVIÄ SÄÄDÖKSIÄ JA VAATIMUKSIA MAAILMALLA	18
4.1	Suomi	18
4.2	Ruotsi	18
4.3	Iso-Britannia.....	19
4.4	Kanada.....	20
4.5	Yhdysvallat.....	20
4.6	Australia	21
5.	UMPILÄHTEIDEN KESTÄVYYTEEN JA KÄYTTÖIKÄÄN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT.....	23
5.1	Valmistusviat.....	23
5.1.1	Hitsisauman laatu	23
5.1.2	Pintavirheet	25
5.2	Mekaaninen rasitus.....	25
5.2.1	Tärinä	25
5.2.2	Kuljetukset ja käsittely	26
5.3	Korroosio.....	27
5.3.1	Raeraja- ja sularajakorroosio	27
5.3.2	Piste- ja rakokorroosio	28
5.3.3	Jännityskorroosio	31
5.3.4	Korroosioväsyminen	33
5.4	Säteilyrasitus	34
5.5	Tulipalo	37
5.5.1	Välittömät vaikutukset	37

5.5.2	Välilliset vaikutukset.....	41
6.	TUTKITTAVAT MATERIAALIT	42
6.1	AISI 316L -kapselit.....	42
6.2	AISI 321 -kapselit	43
7.	TUTKIMUSMENETELMÄT	45
7.1	Kemiallisen koostumuksen määrittäminen.....	45
7.1.1	OES-analyysi	45
7.1.2	SEM-EDS-analyysi	46
7.2	Mikrorakennetarkastelu.....	47
7.2.1	Pyyhkäisyelektronimikroskopia (SEM).....	47
7.2.2	Raekokomäärittäminen.....	49
7.3	Polarisaatiomittaukset	49
7.4	Hitsisaumojen NDT-tarkastus	51
7.4.1	Tunkeumanestetarkastus	51
7.4.2	Radiografinen tarkastus.....	52
8.	TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU.....	54
8.1	Kemiallinen koostumus.....	54
8.2	Mikrorakennetarkastelu.....	56
8.2.1	Kromikarbidien esiintyminen	59
8.2.2	Raekoko	62
8.3	Polarisaatiomittaukset	63
8.4	Hitsisaumojen NDT-tarkastus	66
9.	SUOSITUKSET JA JATKOTOIMET.....	68
9.1	Suosittelun käyttöä ylläpitäminen	68
9.2	Umpilähdevalmistajien tarjoama lisätieto	70
9.3	Riskikohteet säteilylähderekisterissä.....	71
9.4	Jatkotutkimukset.....	72
10.	YHTEENVETO	73
	LÄHTEET.....	76

LIITE A: AISI 316L –KAPSELIN KUVAT

LIITE B: AISI 321 –KAPSELIN KUVAT

LIITE C: DUMMY-LÄHTEIDEN TUTKIMUSRAPORTTI

LYHENTEET JA MERKINNÄT

Yksiköt

a	Vuosi
Bq	Becquerel, SI-järjestelmän mukainen säteilyn aktiivisuuden yksikkö. Radioaktiivisen aineen aktiivisuus on 1 Bq silloin, kun ainemäärässä hajoaa keskimäärin yksi atomi sekunnissa.
eV	Elektronivoltti, energian yksikkö. Suuruudeltaan energiamäärä, jonka elektroni saa kulkiessaan tyhjiössä yhden voltin suuruisen potentiaalieron lävitse.
Sv	Sievert, SI-järjestelmän mukainen säteilyn ekvivalenttiansiannon eli säteilyannoksen yksikkö.
V	Voltti

Kemialliset kaavat

Ag/AgCl	Hopea/hopeakloridi
Cr ₂₃ C ₆	Kromikarbidi
¹³⁷ CsCl	¹³⁷ cesiumkloridi
¹³⁷ CsNO ₃	¹³⁷ cesiumnitraatti
H ⁺	Vetyioni
H·	Vetyradikaali
H ₂ O ₂	Vetyperoksidi
MOH	Metallihydroksidi
NaCl	Natriumkloridi
OH ⁻	Hydroksidi-ioni
OH·	Hydroksyyli-radikaali

Isotoopit

²⁴¹ Am	Amerikiumin radioaktiivinen isotooppi
¹³³ Ba	Bariumin radioaktiivinen isotooppi
¹³⁷ Ba	Bariumin stabiili isotooppi
¹³⁷ Ba ^m	Bariumin lyhytikäinen radioaktiivinen isotooppi
¹³⁷ Cs	Cesiumin radioaktiivinen isotooppi
⁶⁰ Co	Koboltin radioaktiivinen isotooppi
⁵⁵ Fe	Raudan radioaktiivinen isotooppi
⁸⁵ Kr	Kryptonin radioaktiivinen isotooppi
⁶³ Ni	Nikkelin radioaktiivinen isotooppi
¹⁴⁷ Pm	Prometiumin radioaktiivinen isotooppi
²²⁶ Ra	Radiumin radioaktiivinen isotooppi
⁹⁰ Sr	Strontiumin radioaktiivinen isotooppi
²³² Th	Thoriumin radioaktiivinen isotooppi
⁹⁰ Y	Yttriumin radioaktiivinen isotooppi

Lyhenteet

ARPANSA	Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency
CCT	Kriittinen rakorroosiolämpötila (Critical Crevice Temperature)
CNSC	The Canadian Nuclear Safety Commission
CPT	Kriittinen pistekorroosiolämpötila (Critical Pitting Temperature)
EDS	Energy-dispersive X-ray spectroscopy

HASS	Korkea-aktiivinen umpilähde (High Activity Sealed Source)
HAZ	Hitsisauman muutosvyöhyke (Heat Affected Zone)
HSE	The Health and Safety Executive (Iso-Britannia)
NDT	Ainetta rikkomaton testaus (Non-Destructive Testing)
OES	Optinen emissiospektrometri
PKA	Primary Knock-on Atom
PRE	Pistekorroosioekvivalentti (Pitting Resistance Equivalent)
RWL	Suosittelu käyttöikä (Recommended Working Life)
SEM	Pyyhkäisyelektronimikroskoopi (Scanning Electron Microscope)
SSM	Strålsäkerhetsmyndigheten (Ruotsi)
STUK	Säteilyturvakeskus (Suomi)
U.S.NRC	United States Nuclear Regulatory Commission

Termit

Aktiivisuuspitoisuus	Radionuklidin aktiivisuus tarkasteltavana olevan näytteen massa- tai tilavuusyksikköä kohden
Anodi	Sähkökemiallisen parin elektrodi, jossa tapahtuu hapettuminen
Austeniitti	Eräs rautaseosten mikrorakenteen faasi
β^- -hajoaminen	Beeta-miinus-hajoaminen; radioaktiivinen hajoaminen, jossa vapautuu elektroni
Ferriitti	Eräs rautaseosten mikrorakenteen faasi
Isotooppi	Alkuaineen atomeja, joissa on sama määrä protoneja, mutta eri määrä neutroneja
Katodi	Sähkökemiallisen parin elektrodi, jossa tapahtuu pelkistyminen
Nuklidi	Atomiydinlaji, jossa on tietty määrä protoneja ja neutroneja
Ominaisaktiivisuus	Radionuklidin aktiivisuus kyseisen alkuaineen massa- tai mooliyksikköä kohden
Polarisaatio	Potentiaalinmuutos elektrodin ja liuoksen välillä olevassa potentiaalierossa
Puoliintumisaika	Aika, jonka kuluessa puolet aineesta on hajonnut
Radiolyysi	Aineen kemiallisen koostumuksen muuttamista ionisoivalla säteilyllä

1. JOHDANTO

Tämä diplomityö on tehty Säteilyturvakeskukselle Säteilyn käyttö teollisuudessa -yksikköön. Työn tarkoituksena on selvittää umpilähdekapselin ikääntymiseen ja käyttöikään vaikuttavia tekijöitä teollisuuden sovelluksissa ja teollisissa käyttöympäristöissä. Tavoitteena on kirjallisen selvityksen ja kokeellisten tutkimusten pohjalta antaa Säteilyturvakeskukselle suosituksia suositellun käyttöiän ylittäneiden umpilähteiden valvontaan ja mahdollisten riskikohteiden tunnistamiseen. Aiempaa tutkimustietoa aiheesta on hyvin vähän, sillä umpilähdekapseleiden rikkoontuminen on harvinaista.

Umpilähteet ovat yleisesti käytettyjä teollisuuden, tutkimuksen ja lääketieteen sovelluksissa. Umpilähdekapseleiden ikääntymiseen ja tiiviyyteen vaikuttavat olosuhteet näissä eri sovelluksissa vaihtelevat hyvin paljon puhdistilaympäristöistä suurista kemikaalipitoisuuksista ja kosteutta sisältäviin ympäristöihin. Kapselin tiiviys on yksi tärkeimmistä käyttöturvallisuuteen liittyvistä asioista.

Umpilähde koostuu metallikapselista ja sen sisälle tiiviisti suljetusta radioaktiivisesta aineesta. Radioaktiivisen aineen kemiallinen ja fysikaalinen muoto vaihtelee käytetyn nuklidin ja sovelluksen mukaan. Metallikapseli on tyypillisesti ruostumatonta terästä. Kapseli on käytön aikana säteilysuojuksen sisällä, jossa se on hyvin suojattuna mekaaniselta rasitukselta ja vesi- tai kemikaaliroiskeilta. Prosessikemikaalit ja kosteus voivat kuitenkin päästä kosketuksiin umpilähdekapselin kanssa höyrystymisen seurauksena, jolloin umpilähdekapselin pinnalle voi muodostua erilaisia korroosio-olosuhteita.

Kaksi tärkeintä umpilähteitä käsittelevää standardia ovat ISO 2919 ja ISO 9978, jotka käsittelevät umpilähdekapseleiden luokituksia, umpilähteiden mekaanisia testejä, tiiviyskokeita umpilähteiden valmistuksen yhteydessä ja käytön aikana sekä käytön aikaisia pyyhintäkokeita. Lisäksi työssä esitellään umpilähteiden tiiviyskokeita koskevia ohjeistuksia ja suositellun käyttöiän jatkamisen vaatimuksia eri maiden lainsäädännössä ja viranomaisten asettamissa vaatimuksissa.

Umpilähteiden kestävyys ja käyttöikään vaikuttavat tekijät jaetaan neljään ryhmään: valmistusviat, mekaaninen rasitus, korroosio ja säteilyrasitus. Lisäksi työssä käsitellään normaaleista olosuhteista poikkeava tilanne, tulipalo. Korroosio erottuu oleellisimpana tekijänä, sillä kapseliin kohdistuva mekaaninen rasitus ja kapselin sisältä tuleva säteilyrasitus ovat tavallisissa teollisissa käyttöolosuhteissa pieniä. Käyttöolosuhteet etenkin prosessiteollisuudessa taas voivat aiheuttaa korroosionopeuden kasvua umpilähdekapselin pinnalla.

Työn kokeellisessa osuudessa vertaillaan materiaalikarakterisointitutkimusten avulla kahta eri ruostumatonta teräslaatua umpilähdekapselimateriaaleina. Tutkimusaineistona on ”dummy”-umpilähdekapseleita, jotka vastaavat rakenteeltaan ja materiaaleiltaan oikeita umpilähdekapseleita, mutta eivät sisällä radioaktiivisia aineita. Tutkimukset käsittelevät näytekapseleiden kemiallista koostumusta, mikrorakennetta, polarisaatiokäyttämistä sekä hitsisaumojen laatua.

2. UMPILÄHTEET

Umpilähteellä tarkoitetaan säteilylähdettä, jossa radioaktiivinen aine on suljettu tiiviiseen kapseliin tai päällystetty siten, ettei sitä voi koskettaa. Tällä estetään myös radioaktiivisen aineen leviäminen kapselin tai päällyksen ulkopuolelle niissä käyttöolosuhteissa, joihin säteilylähde on suunniteltu. Umpilähteiden sisältämän radioaktiivisen aineen kemiallinen ja fysikaalinen olomuoto sekä umpilähteen kapselin tai päällyksen materiaalit vaihtelevat sovelluksen mukaan. [1] Tässä luvussa esitellään yleisesti umpilähteitä, niiden rakennetta sekä käyttökohteita.

2.1 Rakenne ja materiaalit

Umpilähde on nimensä mukaisesti umpinainen säteilylähde. Radioaktiivinen aine on kapseloitu tai päällystetty sen varmistamiseksi, ettei radioaktiivista ainetta pääse leviämään säteilylähteen ulkopuolelle eikä lähteen käyttäjälle synny sisäistä säteilyannosta. Radiometrisessä mittalaitteessa umpilähde on säteilysuojuksen sisällä. [1]

2.1.1 Radioaktiivinen aine

Radioaktiivinen aine on umpilähteessä tavallisesti pellettinä. Sen kemiallinen ja fysikaalinen olomuoto valitaan siten, että se on mahdollisimman vähän liukenevaa, ja näin ollen kontaminaatioriski on mahdollisimman pieni. Radioaktiivinen aine valitaan säteilyominaisuuksiltaan sopivaksi tiettyyn sovellukseen ja käyttöolosuhteisiin. Nuklidit voivat olla alfa-, beeta- tai gammasäteilijöitä. Yleisimmät teollisuudessa käytetyt nuklidit ja niiden puoliintumisaajat on esitetty taulukossa 1. [1]

Taulukko 1. Yleisimmät teollisuudessa käytetyt nuklidit ja niiden puoliintumisaajat [1; 2]

Nuklidi	Säteilylaji	Puoliintumisaika (a)	Suomessa käytössä olevat umpilähteet, sis. HASS-lähteet (tilanne 2016 lopussa) (kpl)
²⁴¹ Am	α, γ	432,7	331
¹⁴⁷ Pm	β	2,62	90
⁸⁵ Kr	β	10,7	312
⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y	β	29,1	104
¹³⁷ Cs	γ	30,2	4165
⁶⁰ Co	γ	5,27	970
⁵⁵ Fe	γ	2,68	110

Taulukosta 1 nähdään, että yleisimmät gammasäteilijöissä käytetyt nuklidit ovat ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{60}Co ja ^{55}Fe . Koska ^{241}Am -nuklidia käytetään pääasiassa alfasäteilysovelluksissa ja ^{55}Fe -nuklidia röntgensovelluksissa, käsitellään tässä luvussa tarkemmin vain ^{137}Cs - ja ^{60}Co -nuklideja. ^{137}Cs - ja ^{60}Co -nuklidit ovat myös selkeästi lukumäärältään käytetyimmät nuklidit umpilähteiden teollisuuden sovelluksissa.

^{60}Co esiintyy umpilähteissä metallisessa muodossa, yleisimmin pellettinä. Se ei ole helposti liukenevaa eikä näin ollen leviä helposti ympäristöön tai ihmiseen umpilähdekapselin rikkoutuessa. ^{60}Co sisältäviä umpilähteitä päätyy kuitenkin aika ajoin romumetallin joukkoon ja mahdollisesti sulatukseen, jolloin ne voivat saastuttaa suuria määriä metallia. [3]

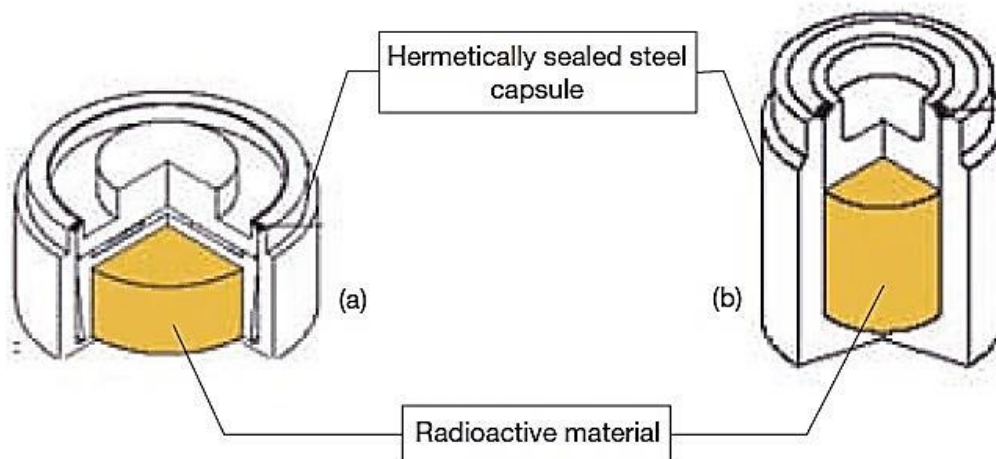
Vanhoissa umpilähteissä ^{137}Cs on tavallisesti cesiumkloridina ($^{137}\text{CsCl}$). Cesiumkloridi on natriumkloridin tapaan kiteinen suola. Tietylle umpilähteelle ominainen määrä $^{137}\text{CsCl}$ -pulveria mitataan muottiin, jossa pulveri puristetaan pelletiksi hydraulisen puristimen ja paineen avulla. Pelletin dimensiot tarkastetaan, jonka jälkeen pelletti siirretään uuniin odottamaan kapselointia. Uunin avulla varmistetaan, että pelletti ei joudu kosketuksiin kosteuden kanssa, sillä cesiumkloridi on huoneenlämmössä hyvin vesiliukoinen. Vesiliukoisuutensa vuoksi $^{137}\text{CsCl}$ voi levitä helposti ympäristöön ja ihmiskehoon esimerkiksi umpilähdekapselin rikkoutuessa. Veteen liuenneena $^{137}\text{CsCl}$ tunkeutuu helposti pieniinkin rakoihin ja kontaminaatio on vaikeasti puhdistettavissa. $^{137}\text{CsCl}$ käytetään kuitenkin jonkin verran myös uusissa umpilähdesovelluksissa, esimerkiksi verensäteilyttimissä, suuren aktiivisuuspitoisuutensa vuoksi. Tällöin pienikokoiseen umpilähteeseen saadaan suuri aktiivisuus, ja säteilyttimen kokoa voidaan pienentää. [3; 4]

Helposti liukenevasta $^{137}\text{CsCl}$:sta aiheutuvaa kontaminaatoriskiä on pyritty vähentämään kehittämällä uusia ^{137}Cs -pelletin valmistustapoja ja yhdisteitä. Umpilähteiden tapauksessa radioaktiivisen aineen kemiallinen olomuoto valitaan nykyään siten, että aine ei onnettomuustilanteissa tai poikkeavissa tapauksissa leviäisi ympäristöön. Umpilähdevalmistajat pyrkivät löytämään cesiumkloridille vaihtoehtoja, jotka ovat liukenevampia ja joiden ominaisaktiivisuus on riittävän suuri. Esimerkiksi umpilähdevalmistaja QSA Global käyttää kahta erilaista kloriditonta ^{137}Cs -pellettiä: sulatettua lasipellettiä ja sintrattua keraamista pellettiä. Ensimmäisessä menetelmässä pelletti muodostetaan sooli-geeli-prosessilla ^{137}Cs -suolasta. Cesium kiinnitetään ioninvaihdolla kiinteisiin lasin raaka-ainepartikkeleihin. Nämä partikkelit geeliytetään ja kuumennetaan. Muodostuva sula lasi liitetään suoraan umpilähteen metallisiin komponentteihin rakenteen kestävyuden parantamiseksi. Toisessa menetelmässä keraami kyllästetään $^{137}\text{cesiumnitraatilla}$ ($^{137}\text{CsNO}_3$) ja kuumennetaan, jonka seurauksena se sintrautuu pelletiksi. Molemmilla tekniikoilla saadaan aikaan kestävä, liukenematon ja termisesti stabiili materiaali. Lasipelletin ominaisaktiivisuus on huomattavasti korkeampi kuin keraamisen pelletin, mutta kuitenkin matalampi verrattuna cesiumkloridipellettiin. Näin ollen lasi- ja keraamipelletit eivät sovi korvaamaan $^{137}\text{CsCl}$ -pellettejä esimerkiksi verensätei-

lyttimissä. Muilta umpilähdevalmistajilta ei ole julkisista lähteistä saatavilla tietoja heidän käyttämiensä ^{137}Cs -pellettien valmistustavoista. [3-6]

2.1.2 Kapseli

Umpilähteen käyttötarkoitus ja säteilyominaisuudet vaikuttavat huomattavasti kapselin rakenteeseen, muotoon ja materiaaleihin. Esimerkkejä umpilähteiden rakenteesta on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1 Tyypillisiä säteilylähteitä: a) levymainen ^{241}Am -lähde, b) sylinterimäinen ^{137}Cs -lähde [7]

Säteilyominaisuuksiltaan pienienerginen alfasäteilylähde vaatii kapseliin ohuen ikkunan, jotta alfasäteily pääsee kapselistä ulos. Ikkunamateriaali on usein berylliumia. Ikkuna heikentää alfasäteilylähteen kapselin mekaanisia ominaisuuksia ja kasvattaa kontaminaatoriskiä. Alfasäteily on hiukkassäteilyä. Alfahiukkasilla on suuri massa, joten ne pysähtyvät nopeasti kohtaamaansa väliaineeseen. Tämän vuoksi ulkoiselta alfasäteilyltä on helppo suojautua. On kuitenkin haitallista, jos alfasäteilevää ainetta pääsee kehon sisälle. [1; 8]

Beetasäteily on alfasäteilyä läpäisevämpää, mutta myös beetasäteilylähteen kapselissa on oltava ohut ikkuna. Ikkuna voi kuitenkin olla jonkin verran paksumpi kuin alfasäteilylähteen kapselissa. Myös beetasäteily on hiukkassäteilyä, mutta beetahiukkanen on massaltaan huomattavasti alfahiukkasta pienempi. Beetasäteilyltä voi suojautua esimerkiksi muovilla, eikä se etene kudoksessa kuin joitakin millimetrejä. [1; 8]

Gammasäteilylähteet ovat tavallisesti yksin- tai kaksinkertaisesti ruostumattomalla teräksellä kapseloituja. Alfa- ja beetasäteilystä poiketen gammasäteily on sähkömagneettista säteilyä eli nopeaa aaltoliikettä, joka etenee esimerkiksi ilmassa satoja metrejä. Gammasäteilyn suuren läpäisykyvyn takia säteilylähteet vaativat käyttöympäristössään raskaan säteilysuojuksen. Suojuksella varmistetaan annosnopeuden pysyminen hyväk-

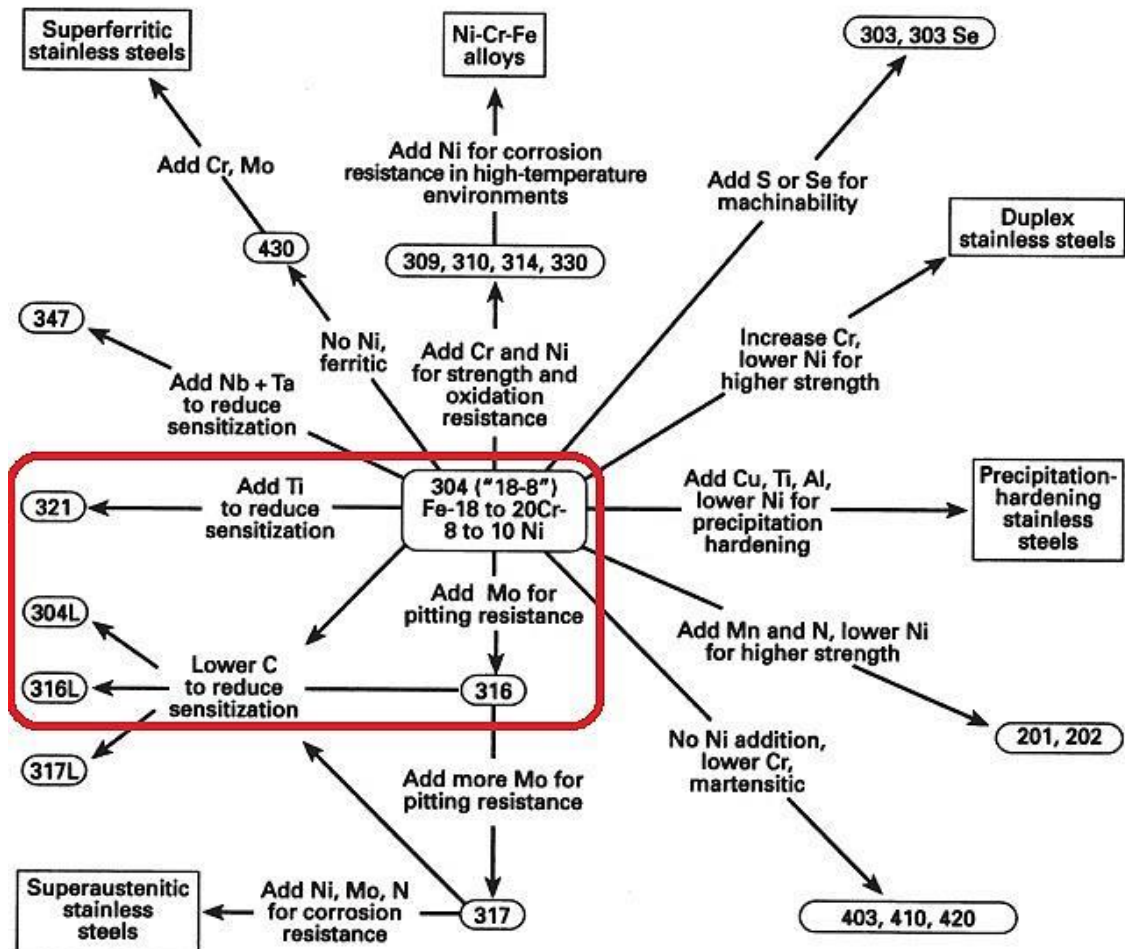
sytyllä tasolla mittalaitteen ulkopuolella. Esimerkkejä säteilysuojuksista on esitetty kuvassa 3. [1; 8]

Yleisin umpilähdekapselien materiaali on ruostumaton teräs, mutta myös muita metallimateriaaleja käytetään. Umpilähdevalmistajien käyttämiä kapselimateriaaleja ovat esimerkiksi ruostumattomat teräkset AISI 304L, 316L ja 321 sekä nikkeli-koboltti-kromi-molybdeeni -seos MP35N. Näiden materiaalien tyypilliset kemialliset koostumukset on esitetty taulukossa 2. Umpilähteiden tapauksessa materiaalien hyvät korroosio-ominaisuudet ovat keskeisempiä esimerkiksi korkean käyttölämpötilan ominaisuuksiin, väsymisen kestoon tai erinomaisiin mekaanisiin ominaisuuksiin verrattuna.

Taulukko 2. Tavallisimpien umpilähdekapselimateriaalien kemialliset koostumukset [9; 10]

Pitoisuudet	C (m-%)	Si (m-%)	Mn (m-%)	Cr (m-%)	Ni (m-%)	Co (m-%)	Mo (m-%)	Ti (m-%)
AISI 304L	0,03 (max)	1,00 (max)	2,00 (max)	17,5 – 19,5	8,0 – 10,5	-	-	-
AISI 316L	0,03 (max)	1,00 (max)	2,00 (max)	16,5 – 18,5	10,0 – 13,0	-	2,0 – 2,5	-
AISI 321	0,08 (max)	1,00 (max)	2,00 (max)	17,0 – 19,0	9,0 – 12,0	-	-	5xC – 0,70
MP35N® (NiCoCrMo)	0,025 (max)	-	-	20,0	35,0	35,0 (max)	10,0	1,00 (max)

Taulukosta 2 nähdään, että ruostumattomat teräslaadut 304L ja 316L ovat koostumukseltaan muuten hyvin samankaltaisia, mutta 316L-laatuun on lisätty hieman molybdeeniä. Molybdeeni parantaa merkittävästi ruostumattoman teräksen korroosionkestävyyttä yleistä ja paikallista korroosiota vastaan tehden näin 316L-laadusta sopivamman myös haastaviin, kemikaaleja tai muita korrodoivia aineita sisältäviin käyttöolosuhteisiin. Ruostumaton teräslaatu 321 eroaa 304L- ja 316L-laaduista pääasiassa korkeamman hiilipitoisuuden osalta. Erittäin matala hiilipitoisuus pienentää raerajakorroosion riskiä 304L ja 316L –teräksissä hitsauksen jälkeen. 321-laadun korkeamman hiilipitoisuuden takia siihen on lisätty titaania parantamaan teräksen raerajakorroosionkestoa. [11] Kuvassa 2 on esitetty, kuinka ruostumattomien terästen seosaineet ja ominaisuudet linkittyvät toisiinsa.



Kuva 2 Seosaineiden vaikutus eri teräslaatuojen ominaisuuksiin [12]

Tässä työssä käsiteltävät teräslaadut on rajattu kuvassa 2 punaisella. Kaikki kolme laatua ovat austeniittisia ruostumattomia teräksiä.

Taulukossa 2 selkeästi muista erottuva materiaali on nikkeli-koboltti-kromi-molybdeeni-seos MP35N. MP35N on yhdysvaltalaisen SPS Technologies –yhtiön rekisteröity tuotemerkki. Se on monifaasiteräs, jolla on korkea lujuus ja erinomainen korroosionkesto. Seos kestää yleistä korroosiota, rakokorroosiota ja jännityskorroosiota. Umpilähdevalmistajista QSA Global käyttää MP35N-seosta joissakin umpilähteissään kapselimateriaalina. [10]

Umpilähdekapseli suljetaan hitsaamalla niin, ettei sitä voida avata rikkomatta kapselia. Näin umpilähdekapselia ei voi vahingossa avata ja kontaminaatoriski on pienempi. QSA Global ilmoittaa käyttävänsä TIG- ja laserhitsausmenetelmiä kapselien sulkemisessa. Tietoa muiden umpilähdevalmistajien käyttämistä hitsausmenetelmistä ei ole julkisesti saatavilla. [5]

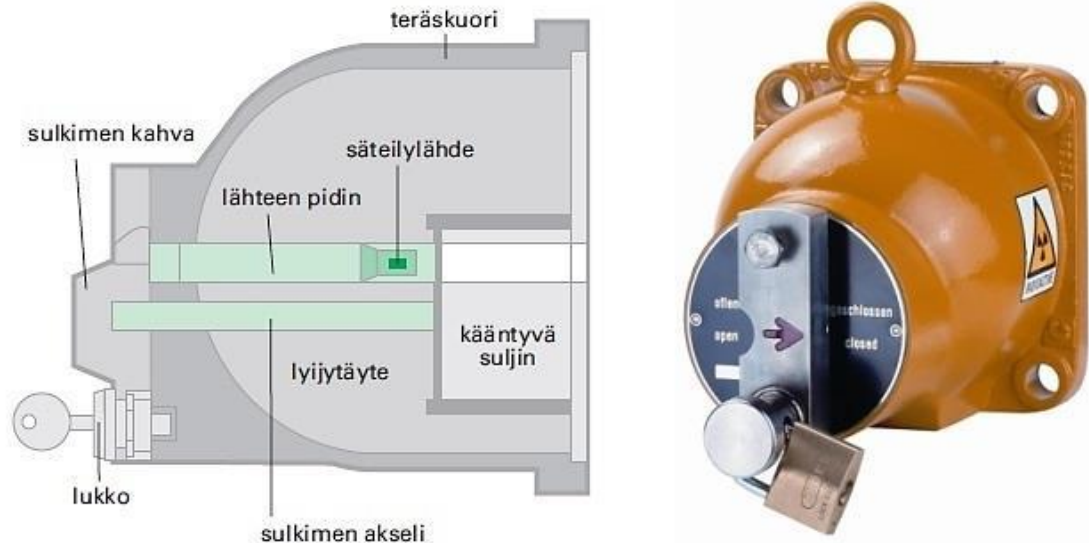
TIG-hitsaus (Tungsten Inert Gas) on kaarihitsausprosessi, jossa valokaari syntyy sulamattoman volframielektrodin ja hitsattavan materiaalin välille. Hitsauksen suojaakaasuna

käytetään inerttiä kaasua, nykyisin tavallisesti argonia, joka suojaa hitsin muutosvyöhykettä, sulaa metallia sekä elektrodia ilman hapettavilta vaikutuksilta. Vaihtoehtoisena suojakaasuna voidaan käyttää myös heliumia. Hitsauksessa voidaan käyttää lisäainetta, joka vastaa koostumukseltaan hitsattavaa materiaalia, tai hitsaus voidaan suorittaa ilman lisäainetta vain sulattamalla hitsattavat kappaleet yhteen. TIG-hitsausmenetelmällä voidaan hitsata hyvin monia eri metalleja, kuten esimerkiksi teräksiä, ruostumattomia teräksiä, nikkelseoksia, titaania, alumiinia sekä kuparia. TIG-hitsauksella voidaan hitsata myös eri metallilaatuja toisiinsa. TIG-hitsausmenetelmän merkittävänä etuna on keskitetty valokaari ja hyvin kontrolloitava lämmöntuonti, joiden ansiosta hitsauksessa syntyvä, korroosiolle herkkä muutosvyöhyke (Heat Affected Zone, HAZ) on kapea. [13]

Laserhitsaus on sädehitsausprosessi, jossa suurienergisien lasersäteiden avulla sulatetaan ja höyrytetään metallia ja suoritetaan hitsaus. Myös laserhitsauksessa käytetään suojakaasua sulan metallin sekä hitsauslaitteen osien suojaamiseen. Suojakaasuina käytetään inerttiä typpeä, argonia ja heliumia. Hitsauksessa voidaan käyttää tarvittaessa myös lisäainetta. Laserhitsausta voidaan käyttää monien metallien, kuten hiiliterästen, ruostumattomien terästen, titaanin, alumiinin ja nikkelseosten, hitsaamiseen. Laserhitsauksessa lämmöntuonti materiaaliin pysyy alhaisena, minkä vuoksi saadaan aikaan kapea hitsi. Alhaisen lämmöntuonnin etuja ovat esimerkiksi pienempi hitsin muutosvyöhyke ja pienemmät lämmöstä aiheutuvat muodonmuutokset materiaalissa. [14; 15]

2.1.3 Säteilysuojus

Gammasäteilyn läpäisykyvyn takia gammasäteilylähde on käyttöympäristössään sijoitettu säteilysuojuksen sisälle. Näin varmistetaan käyttöhenkilökunnan turvallinen työskentely myös väliaikaisesti säteilylähteen läheisyydessä tai huoltotöiden aikana. Säteilysuojus koostuu teräskuoresta, jonka sisällä on lyijytäyte. Näin säteily vaimenee riittävän alhaiselle tasolle muualla kuin säteilykeilan suunnassa. Umpilähdekapseli asetetaan säteilysuojuksen sisään lähteen pitimeen. Esimerkki säteilysuojuksesta on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3 Esimerkki säteilysuojuksista [1; 16]

Kuvassa 3 on esitetty erään säteilysuojuksen rakennekuva ja valokuva. Suojuksen rakenteen tulee olla sellainen, että sulkimen ollessa auki-asennossa säteilyä pääsee vain tiettyyn suuntaan kohti tutkittavaa ainetta ja säteilyn ilmaisinta. Säteilysuojuksen tulee rajoittaa säteilylähteen annosnopeus metrin päässä säteilylaitteesta korkeintaan arvoon $7,5 \mu\text{Sv/h}$ muualla kuin säteilykeilassa. Suojuksen tulee suojata säteilylähdettä myös ulkoiselta mekaaniselta rasitukselta, ympäristövaikutuksilta sekä mahdollisissa tulipalotilanteissa. [1; 17]

2.2 Yleisimpiä sovelluksia

Umpilähteitä käytetään hyvin monenlaisissa sovelluksissa niin terveydenhuollossa, tutkimuksessa kuin teollisuudessakin. Tässä työssä keskitytään umpilähteisiin teollisuudessa, joten tämä luku esittelee yleisimpiä umpilähteiden teollisia sovelluksia.

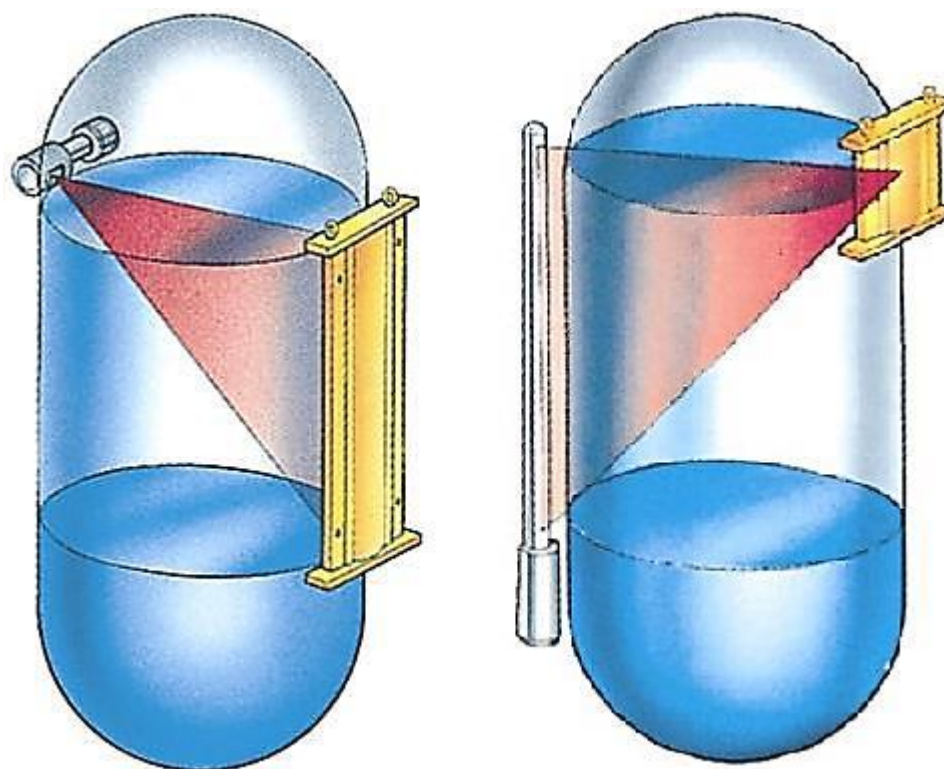
Umpilähteitä käytetään teollisuudessa yleisesti erilaisina radiometrisinä mittalaitteina prosessien eri vaiheissa. Tässä luvussa esitellyt sovellukset ja niistä saatava tieto perustuvat säteilyn vaimenemiseen ja sen havaitsemiseen. Radiometrisillä mittalaitteilla voidaan mitata vaikeissa olosuhteissa, nopeilla tuotantolinjoilla ja ilman mekaanista kosketusta mitattavaan aineeseen. Suurienergisiiä gammasäteilijöitä voidaan lisäksi käyttää mittauksiin putkien ja säiliöiden ulkopuolelta häiritsemättä prosessin kulkua. Mittalaitteet koostuvat säteilysuojuksen sisällä olevasta umpilähteestä, säteilyn ilmaisimesta ja mittauselektronikasta. [1]

2.2.1 Pintakytkin ja pinnankorkeusmittari

Pintakytkin ja pinnankorkeusmittari ovat hyvin yleisiä radiometrisiä mittalaitteita teollisuudessa. Niitä käytetään prosessin osana materiaalivirtojen ohjaamiseen. Pintakytkimet ja pinnankorkeusmittarit ovat hyvin yleisiä esimerkiksi sellu- ja paperitehtaissa prosessien eri vaiheiden materiaalivirtojen hallinnassa. [1]

Pintakytkimellä havaitaan, onko säiliön materiaalapinta sille asetettujen rajojen ylä- vai alapuolella. Tavallisesti säiliössä käytetään sekä ylä- että alapintakytkintä. Säteilysuojuksessa oleva umpilähde asennetaan säiliöön, suppiloon tai muuhun paikkaan halutulle korkeudelle. Samalle korkeudelle säiliön vastakkaiselle puolelle asennetaan säteilyn vastaanottava säteilynilmaisim. Mikäli säteilynilmaisimelle pääsevä säteily on vaimentumatonta, tarkoittaa se, että mitattavan materiaalin pinta on säiliössä säteilykeilan alapuolella. Mikäli materiaalin pinta on säteilykeilan yläpuolella, havaitaan säteily vaimentuneena säteilynilmaisimella. Mittauselektroniikka tulkitsee säteilynilmaisimen viestin: mikäli materiaalin pinta alittaa alapintakytkimen rajan, on kyse säiliön alitäytöstä; mikäli materiaalin pinta taas ylittää yläpintakytkimen rajan on kyse säiliön ylitäytöstä. Tämän tulkinnan mukaisesti ohjataan säiliön täyttöä tai tyhjennystä. [1]

Pinnankorkeusmittaria käytetään ilmoittamaan säiliön tarkka täyttöaste. Pinnankorkeusmittarin toimintaperiaate on hyvin samantyyppinen pintakytkimen kanssa: säteilylähteen lähettämän säteilyn intensiteetistä päätellään materiaalin pinnankorkeus. Mitattavan aineen pinnan noustessa tai laskiessa säteilynilmaisimen havaitsema säteily lisääntyy tai vähenee, ja tästä tiedosta mittauselektroniikka tulkitsee säiliön pinnankorkeuden. Pinnankorkeusmittaus voidaan toteuttaa erilaisilla tavoilla, joista kaksi on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Pinnankorkeusmittaus; vasen puoli: pistemäinen ilmaisim (harmaa) ja sauvamainen säteilylähde (keltainen), oikea puoli: sauvamainen ilmaisim (harmaa) ja pistemäinen säteilylähde (keltainen) [18]

Kuvassa 4 on esitetty kaksi erilaista tapaa säiliön pinnankorkeuden mittaukseen. Vasemmanpuoleisessa asennuksessa on käytetty harmaana kuvattua pistemäistä säteilynlähdettä ja keltaisena kuvattua sauvamaista säteilylähdetä. Materiaalin pinnan nousu vähentää ilmaisimen havaitsemaa säteilyn määrää ja pinnan lasku taas lisää sitä. Oikean puoleisessa asennuksessa on käytetty harmaana kuvattua sauvamaista säteilynlähdettä ja keltaisena kuvattua pistemäistä säteilylähdetä. Tällaisessa asennuksessa toimintaperiaate on sama kuin edellisessä. [1]

Sekä pintakytkimissä että pinnankorkeusmittareissa käytetään yleisesti ^{137}Cs - ja ^{60}Co -lähteitä. Säteilylähteiden tyypilliset aktiivisuudet näissä sovelluksissa on esitetty taulukossa 3.

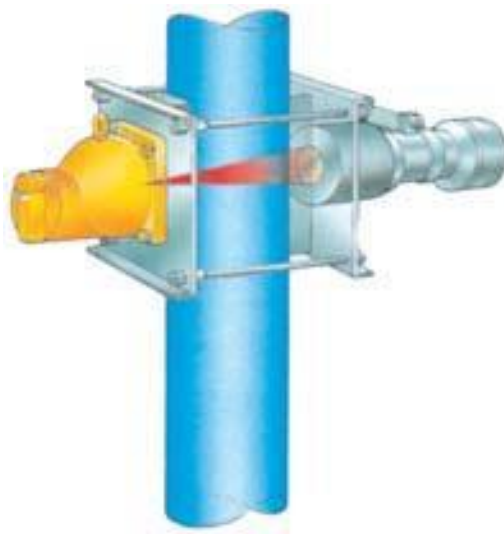
Taulukko 3. Pintakytkimien ja pinnankorkeusmittareiden säteilylähteiden tyypilliset aktiivisuudet [1]

Sovellus	Nuklidi	Aktiivisuus
Pintakytkin	^{137}Cs	37 MBq – 37 GBq
	^{60}Co	37 MBq – 3,7 GBq
Pinnankorkeusmittari	^{137}Cs	1,85 – 18,5 GBq
	^{60}Co	37 – 370 MBq

Lähteiden aktiivisuudet vaihtelevat eri sovelluksissa paljon säiliön seinämän paksuudesta ja materiaalista, säiliön halkaisijasta, mitattavasta materiaalista ja ilmaisimen herkkyydestä riippuen. [1]

2.2.2 Tiheysmittari

Radiometrisellä tiheysmittarilla saatavaa tietoa käytetään prosessiteollisuudessa prosessin ohjaukseen. Tiheysmittarin toiminta perustuu säteilyn vaimenemiseen, kuten pintakytkimessä ja pinnankorkeusmittarissakin. Mitä tiheämpää putkessa kulkeva aine on, sitä enemmän säteily vaimenee kulkiessaan putken läpi säteilylähteestä säteilynilmaisimelle. Yksi tapa tiheysmittaukselle on esitetty kuvassa 5. [1]

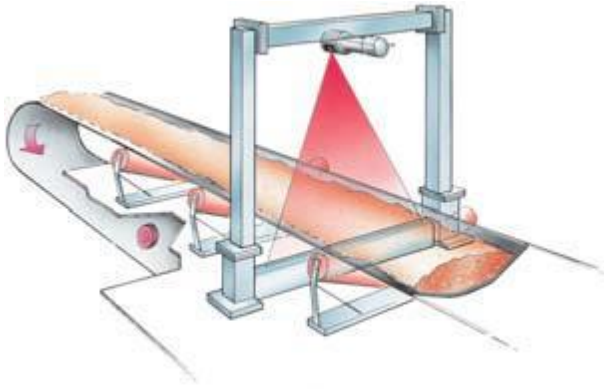


Kuva 5. Tiheysmittaus: säteilylähte keltaisena putken vasemmalla puolella, ilmaisim oikealla puolella [18]

Tiheysmittari täytyy kalibroida oikein, jotta aineen tiheys voidaan saada selville säteilyn vaimenemisen perusteella. Säteilylähteenä tiheysmittarissa käytetään tavallisesti nuklidia, jolla on pitkä puoliintumisaika, jotta mittaustulos muuttuisi mahdollisimman vähän säteilylähteen heikentyessä eikä mittaria tarvitsisi kalibroida niin usein uudelleen. Tästä syystä tiheysmittarissa käytetään yleensä ^{137}Cs -umpilähdettä, jonka puoliintumisaika on 30,2 vuotta. ^{137}Cs -lähteen aktiivisuus tiheysmittarissa on tavallisesti 370 MBq – 1,11 GBq. [1]

2.2.3 Kuljetinvaaka

Radiometristä kuljetusvaakaa käytetään prosessiteollisuudessa kuljettimella kulkevan aineen määrän mittaukseen. Myös kuljetinvaaka'n toiminta perustuu säteilyn vaimenemiseen ja siitä tulkittavaan viestiin. Kuljetinvaaka on esitetty kuvassa 6. [1]



Kuva 6. Kuljetinvaaka: säteilylähde hihnan alla, ilmaisin yläpuolella [18]

Kuvassa 6 nähdään sauvamainen säteilylähde kuljetinhihnan alapuolella ja pistemäinen säteilynilmaisin kuljetushihnan yläpuolella. Kuvassa punaisella esitetty säteilykeila suuntautuu todellisuudessa laajemmalle alueelle, minkä vuoksi vaa'an kehys on lyijytetty. [1]

Säteilynilmaisimelle pääsevä säteily vaimenee sitä enemmän, mitä enemmän kuljettimella kulkee mitattavaa ainetta. Säteilyn vaimenemiseen vaikuttavat mitattavan aineen tiheys sekä ainekerroksen paksuus ja leveys. Kuljettimen kulkunopeuden ja säteilyn vaimenemisen perusteella saadaan selville kuljettimella kulkevan aineen määrä. Umpilähteinä kuljetinvaaoissa käytetään mitattavasta materiaalista riippuen ^{241}Am -, ^{137}Cs - tai ^{60}Co -lähteitä. [1]

3. UMPILÄHDESTANDARDIT

Useat kansainväliset standardit käsittelevät radioaktiivisia aineita sisältäviä umpilähteitä ja niiden säteilyturvallisuutta. Standardeissa käsitellään umpilähteiden yleisiä vaatimuksia ja luokituksia, umpilähdevalmistajien umpilähteille suorittamia mekaanisia testejä, tiiviyskokeita niin umpilähteitä valmistettaessa kuin käytön aikana sekä käytön aikaisia pyyhintäkokeita. Näiden standardien avulla pyritään varmistamaan valmistettujen umpilähteiden säteilyturvallisuus sekä käyttöturvallisuus koko umpilähteen elinkaaren aikana. Tässä luvussa esitellään kaksi tärkeintä umpilähteitä koskevaa standardia.

3.1 ISO 2919: Radiation protection – Sealed radioactive sources – General requirements and classification

Standardi ISO 2919: Radiation protection – Sealed radioactive sources – General requirements and classification käsittelee radioaktiivisten umpilähteiden yleisiä vaatimuksia ja luokituksia. Umpilähteen luokittelu merkitään koodilla, josta käy ilmi luokitteluun käytetyn standardin hyväksymisvuosi, aktiivisuustason luokka (C tai E) sekä umpilähteen suorituskky mekaanisissa testeissä. Lisäksi tietyn mallisilla umpilähteillä koodiin merkitään tieto taivutuskokeesta. Esimerkiksi koodissa

ISO/11/C43515(1),

11 on luokittelussa käytetyn standardin hyväksymisvuosi, *C* tarkoittaa, että umpilähteen aktiivisuus ei ylitä erikseen määriteltyä arvoa, numerosarja *43515* osoittaa umpilähteen suorituskvyn mekaanisissa testeissä ja *(1)* osoittaa umpilähteelle suoritettun taivutuskkeen tyyppin. [19]

Umpilähteen suorituskky mekaanisissa testeissä osoitetaan viisinumeroisella numerosarjalla, jossa kukin numero vaihtelee välillä 1–6, osoittaen käytetyn testin vaativuutta. Käytetyt mekaaniset testit ja niiden luokitus on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Umpilähteen mekaaniset testit ja niiden luokitus [19]

Test	Class								
	1	2	3	4	5	6	7	8	X
Temperature	No test	−40 °C (20 min) +80 °C (1 h)	−40 °C (20 min) +180 °C (1 h)	−40 °C (20 min) +400 °C (1 h) and thermal shock to 20 °C	−40 °C (20 min) +600 °C (1 h) and thermal shock to 20 °C	−40 °C (20 min) +800 °C (1 h) and thermal shock to 20 °C	Not used	Not used	Special test
External pressure	No test	25 kPa absolute to atmos- pheric	25 kPa absolute to 2 MPa absolute	25 kPa absolute to 7 MPa absolute	25 kPa absolute to 70 MPa absolute	25 kPa absolute to 170 MPa absolute	Not used	Not used	Special test
Impact	No test	50 g from 1 m or equivalent imparted energy	200 g from 1 m or equivalent imparted energy	2 kg from 1 m or equivalent imparted energy	5 kg from 1 m or equivalent imparted energy	20 kg from 1 m or equivalent imparted energy	Not used	Not used	Special test
Vibration	No test	3 times 10 min 25 Hz to 500 Hz at 49 m/s ² (5 g) ^a	3 times 10 min 25 Hz to 50 Hz at 49 m/s ² (5 g) ^a and 50 Hz to 90 Hz at 0,635 mm peak to peak and 90 Hz to 500 Hz at 98 m/s ² (10 g) ^a	3 times 10 min 25 Hz to 80 Hz at 1,5 mm peak to peak and 80 Hz to 2 000 Hz at 196 m/s ² (20 g) ^a	Not used	Not used	Not used	Not used	Special test
Puncture	No test	1 g from 1 m or equivalent imparted energy	10 g from 1 m or equivalent imparted energy	50 g from 1 m or equivalent imparted energy	300 g from 1 m or equivalent imparted energy	1 kg from 1 m or equivalent imparted energy	Not used	Not used	Special test
Bending	No test	Test 7.7.1 100 N (10,2 kg) for L/D > 15	Test 7.7.1 500 N (51 kg) for L/D > 15	Test 7.7.1 1 000 N (102 kg) for L/D > 15	Test 7.7.1 2 000 N (204 kg) for L/D > 15	Test 7.7.1 4 000 N (408 kg) for L/D > 15	Test 7.7.2 for L > 100 mm and for L/D > 10	Test 7.7.3 for brachy- therapy needle with L > 30 mm	Special test

^a 1 g = 9,8 m/s².

Taulukossa 4 nähdään eri testausluokat lämpötilan-, ulkoisen paineen-, iskun-, värinän- ja puhkaisunkestävyyden testaamisessa. Ohjeet testien tarkempaan suoritukseen löytyvät standardista. Testin läpäisy varmistetaan tarkastamalla umpilähteen tiiviys jokaisen testin jälkeen. Tarkastus suoritetaan visuaalisesti sekä standardin ISO 9978 mukaisella tiiviyskokeella. Lisäksi umpilähteen käyttäjä ja valmistaja voivat sopia tapauskohtaisesti umpilähteelle suoritettavista täydentävistä testeistä, mikäli lähde saattaa altistua esimerkiksi tulipalolle, räjähdykselle tai korroosiolle. [19]

Umpilähteen valmistaja määrittelee umpilähteelle myös suositellun käyttöiän (Recommended working life, RWL), jonka ajan valmistaja odottaa umpilähteen säilyttävän suorituskykynsä suunnitellussa käyttökohteessa ja sovelluksessa. Suositellun käyttöiän lopussa tai suunniteltujen käyttöolosuhteiden olennaisesti muuttuessa umpilähteen soveltuvuus käytön jatkamiseen tulee arvioida. Arvioinnin yhteydessä tulee suorittaa tiiviys- ja/tai kontaminaatiotestaus ja käyttöturvallisuuden arviointi sovelluksessa sekä käyt-

töympäristössä. Umpilähteen käyttökunnon säännöllinen tarkastus ja testaus on lähteen käyttäjän vastuulla. [19]

Valmistuksen yhteydessä umpilähteen valmistajan tulee varmistua, ettei umpilähdekapselin pinta ole kontaminoitunut ja että umpilähdekapseli on tiivis. Pyyhintäkoee ja tiiviyskokeet suoritetaan standardin ISO 9978 mukaisesti. Umpilähdekapseli tulee mahdollisuuksien mukaan merkitä seuraavilla tiedoilla:

- sana ”radioactive” tai radioaktiivisuuden merkki
- valmistajan nimi tai symboli
- sarjanumero
- radionuklidin massaluku ja kemiallinen merkki
- neutronilähteiden tapauksessa ”target element” [19]

Valmistajan tulee aina tarjota umpilähteelle sertifikaatti, josta selviää seuraavat tiedot:

- valmistajan nimi
- umpilähteen tyyppikoodi
- mallinimi
- sarjanumero
- lyhyt kuvaus sisältäen radionuklidin kemiallisen merkin ja massaluvun
- suositeltu käyttöikä
- radioaktiivisen aineen aktiivisuus
- säteilyn tuotto
- pintakontaminaation testaustapa, testin tulos sekä päivämäärä
- tiiviyskokeen tapa, testin tulos sekä päivämäärä

Näillä standardin esittämillä toimilla umpilähdevalmistaja voi varmistua tuotteensa turvallisuudesta käyttöönotettaessa sekä tarjota riittävästi informaatiota umpilähteen käyttäjälle. [19]

3.2 ISO 9978: Radiation protection – Sealed radioactive sources – Leakage test methods

Standardi ISO 9978: Radiation protection – Sealed radioactive sources – Leakage test methods käsittelee radioaktiivisille umpilähteille suoritettavia tiiviyskokeita ja pyyhintäkokeita. Tiiviyskokeilla varmistetaan umpilähdekapselin tiiviyys, ettei radioaktiivista ainetta pääse kapselin sisältä ympäristöön. Pyyhintäkokeella varmistetaan, ettei umpilähdekapselin pinnalla ole pintakontaminaatiota, joka voisi levitä esimerkiksi umpilähteen käyttäjään. Mikäli pyyhintäkokeessa havaitaan kontaminaatiota, voidaan epäillä myös umpilähdekapselin tiiviyyttä. [20]

Tavallisin umpilähteen tiiviyskoe kiinteää radioaktiivista ainetta sisältäville lähteille on upotuskoe. Upotuskokeesta on neljä eri versiota sen mukaan, millaiseen nesteeseen umpilähde upotetaan. Pääperiaate kuitenkin on, että umpilähde puhdistetaan ensin huolellisesti, jonka jälkeen se upotetaan riittävään määrään nestettä, joka ei vahingoita umpilähteen ulkokuorta. Nesteen tulee myös olla tehokas irrottamaan mahdolliset radioaktiivisen aineen jäämät. Umpilähde pidetään upotettuna standardin osoittaman ajan, jonka jälkeen umpilähde poistetaan nesteestä ja nesteen aktiivisuus mitataan. Mikäli mitattu aktiivisuus ei ylitä 0,2 kBq, umpilähdettä voidaan pitää tiiviinä. [20]

Pyyhintäkoe voidaan suorittaa kostealla tai kuivalla pyyhinnällä. Tavallisesti pyyhintäkoe suoritetaan imukykyisellä liinalla, joka on kostutettu nesteellä, joka ei vahingoita umpilähteen ulkokuorta ja joka irrottaa tehokkaasti mahdolliset radioaktiivisen aineen jäämät. Umpilähde pyyhitään huolellisesti kaikilta pinnoilta, minkä jälkeen liinan aktiivisuus mitataan. Joissakin tapauksissa voidaan käyttää kuivaa pyyhintäkoetta, joka suoritetaan muutoin samoin kuin kostea pyyhintäkoe, mutta käytetty pyyhintäliina on kuiva. Mikäli mitattu aktiivisuus ei ylitä 0,2 kBq, umpilähdettä voidaan pitää tiiviinä. [20]

Upotuskoetta käytetään esimerkiksi umpilähteen valmistuksen yhteydessä varmistamaan valmistetun umpilähddekapselin tiiviys valmistajan toimesta. Upotuskoetta käytetään myös valmistajan suorittamien umpilähteen mekaanisten testien läpäisyn osoittamisessa sekä suositellun käyttöajan ylittäneiden umpilähteiden käyttökunnon varmistuksessa. Pyyhintäkoetta käytetään umpilähteen valmistuksen yhteydessä varmistamaan, ettei lähde ole pintakontaminoitunut eikä kontaminoi lähteen käyttäjää. Pyyhintäkoetta käytetään myös umpilähddekapselin tiiviyn tarkastelussa esimerkiksi lähteiden vaihdon, eteenpäin luovutuksen tai suositellun käyttöajan ylityksen yhteydessä. [20]

4. UMPILÄHTEIDEN IKÄÄNTYMISEEN LIITTYVIÄ SÄÄDÖKSIÄ JA VAATIMUKSIA MAAILMALLA

Tässä luvussa käsitellään umpilähdekapseleiden ikääntymiseen liittyviä vaatimuksia ja säädöksiä maailmalla. Aiheen rajaamiseksi luvussa on käsitelty umpilähdekapseleiden käytön aikaisia tiiviyskokeita sekä vaatimuksia umpilähteen käytön jatkamiselle suositellun käyttöiän jälkeen. Näitä aiheita on käsitelty Suomen, Ruotsin, Iso-Britannian, Kanadan, Yhdysvaltojen ja Australian säteilyn käyttöä valvovien viranomaisten ohjeistusten näkökulmista.

4.1 Suomi

Säteilyturvakeskus (STUK) on sosiaali- ja terveysministeriön hallinnonalaan kuuluva Suomen säteilyvalvonnasta ja ydinturvallisuusvalvonnasta vastaava viranomainen. Säteilyturvakeskuksen tavoitteena on ihmisten, yhteiskunnan, ympäristön ja tulevien sukupolvien suojeleminen säteilyn haitallisilta vaikutuksilta.

Säteilyturvakeskus ohjeistaa suorittamaan umpilähteille pyyhintäkokeita standardin ISO 9978 mukaisesti tai muulla soveltuvalla tavalla. Pyyhintäkoe tulee suorittaa aina, kun umpilähde vaihdetaan, luovutetaan toiselle toiminnanharjoittajalle ja edellisestä pyyhintäkokeesta on yli vuosi, irrotetaan käyttöpaikaltaan, tai jos ympäristöolosuhteet tai muut syyt ovat voineet heikentää umpilähdekapselin tiiviyyttä. Pyyhintänäytteessä havaitun aktiivisuuden suurin sallittu arvo on 200 Bq. Mikäli tämän rajan ylittävä vuoto umpilähteessä havaitaan, tulee asiasta ilmoittaa Säteilyturvakeskukselle. Tulee myös varmistaa, ettei vuoto tai kontaminaatio aiheuta vaaraa käyttöpaikalla. [21]

Kuljetettaville säteilylähteille pyyhintäkoe on suoritettava vähintään viiden vuoden välein. Korkea-aktiivisille umpilähteille pyyhintäkoe suoritetaan vähintään kerran vuodessa. Tarpeen mukaan pyyhintäkokeita täytyy tehdä säännöllisesti, ottaen huomioon esimerkiksi valmistajan asettaman suositellun käyttöiän ylittyminen sekä umpilähteen käyttöolosuhteet. [21]

4.2 Ruotsi

Ruotsissa säteilyturvallisuusviranomainen on Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM), joka raportoi ympäristö- ja energiaministeriölle. SSM toimii ydinturvallisuuden, säteilysuojelun ja ydinaseiden leviämisen estämisen alueilla.

Muiden kuin korkea-aktiivisten umpilähteiden kunto tulee tarkistaa vuosittain eikä niitä saa altistaa tavallisista käyttöolosuhteista poikkeaville kemiallisille tai mekaanisille rasituksille. Siirrettävät umpilähteet tulee tarkistaa radioaktiivisen vuodon varalta vähintään kerran vuodessa. Pyyhintäkokeiden tulokset tulee kirjata umpilähteen tietoihin. [22]

Korkea-aktiivisista umpilähteistä tulee pitää tarkkaa kirjanpitoa ja tarkistaa niiden käyttö- tai varastointisijainnit sekä laitteiden näkyvä kunto vähintään kerran kuussa. Haltijan tulee huolehtia, että soveltuvat testit umpilähteen eheyden varmistamiseksi suoritetaan vähintään kerran vuodessa tai aina, jos on syytä epäillä umpilähteen vahingoittuneen. Eheys varmistetaan standardin ISO 9978 mukaisella pyyhintäkokeella tai muulla vastaavanlaisella menetelmällä. Kaikkien pyyhintäkokeiden tulokset tulee kirjata umpilähteen tietoihin. [23]

Tulipalon tai muun mahdollisesti umpilähdettä vahingoittaneen tapahtuman jälkeen umpilähde on tarkistettava. Mikäli umpilähde on vahingoittunut, on siitä ilmoitettava viranomaiselle. Vahingoittunutta umpilähdettä ei saa käyttää. [23]

Ohjeistusta umpilähteen käytön jatkamiselle suositellun käyttöiän jälkeen ei ole.

4.3 Iso-Britannia

Iso-Britanniassa The Health and Safety Executive (HSE) on pääasiallinen julkinen elin, joka säätelee työtä, joka aiheuttaa tai voi aiheuttaa säteilyaltistusta työntekijöille, väestölle tai molemmille.

HSE ohjeistaa suorittamaan umpilähteiden pyyhintäkokeet normaalisti suoraan umpilähdekapselin päältä parhaimman mahdollisen varmuuden saamiseksi. Mikäli umpilähdekapseli on vaikeapääsyisessä paikassa tai testin suorittaja voi altistua liialliselle säteilyannokselle, tiiviyskokeet voidaan suorittaa myös epäsuorasti muulta pinnalta. Testin suorittamiseen käytetään umpilähteen valmistajan ohjeita tai standardia ISO 9978. Tiiviyskokeita suositellaan tekemään kahden vuoden välein. Tiheämpää testiväliä suositellaan tilanteisiin, joissa umpilähteen fyysiset tai kemialliset käyttöolosuhteet ovat sellaiset, joissa umpilähdekapseli tai sen sisältö voivat vaurioitua tai kulua, tai radioaktiivisen aineen vuodon seuraukset voivat olla erityisen vakavat. Lisäksi ylimääräisiä tiiviyskokeita suositellaan, jos epäillään umpilähdekapselin vaurioitumista tai kapselin eheys on voinut vaarantua. [24]

Mikäli umpilähteen valmistaja tai toimittaja ei ole määritellyt umpilähteelle suositeltua käyttöikää, suositellaan lähteen kunto tarkastamaan ensimmäistä kertaa viiden vuoden kuluttua valmistuksesta tai pyytämään tarkempaa arviota asiantuntijalta. Mikäli umpilähteen käyttöä jatketaan suositellun käyttöiän jälkeen, tiiviyskokeille suositellaan tiheämpää testiväliä. Tarkempaa ohjeistusta umpilähteen käytön jatkamiselle suositellun käyttöiän jälkeen ei ole. [24]

4.4 Kanada

Kanadassa säteilyn käyttöä valvova viranomainen on The Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC). CNSC sääntelee ydinenergian ja -materiaalien käyttöä suojellakseen terveyttä, turvallisuutta ja ympäristöä, toteuttaakseen Kanadan kansainvälisiä sitoumuksia ydinenergian rauhanomaisesta käytöstä ja levittääkseen objektiivista tieteellistä, teknistä ja säädöksiin liittyvää tietoa yleisölle.

Jokaisen luvanhaltijan, joka pitää hallussaan, käyttää tai tuottaa vähintään 50 MBq ydinaineita sisältäviä umpilähteitä, tulee suorittaa umpilähteille tiiviyskokeita. Tiiviyskokeita tulee suorittaa seuraavasti:

- Ennen kuin yli 12 kuukautta varastoituna ollut umpilähde otetaan käyttöön
- Varastoituna olevalle umpilähteelle 2 vuoden välein
- Aina kun umpilähde on voinut jonkin tapauksen seurauksena vahingoittua
- Säteilylaitteessa olevalle umpilähteelle 12 kuukauden välein
- Umpilähteelle, joka ei ole säteilylaitteessa, 6 kuukauden välein

Yllä oleviin vaatimuksiin on muutama poikkeus, jolloin tiiviyskoetta ei vaadita. Tiiviyskokeessa havaitun vuodon aktiivisuuden raja on 200 Bq. Mikäli tämän rajan ylittävä vuoto umpilähteessä havaitaan, umpilähteen ja säteilylaitteen käyttö tulee lopettaa, suoritetaan toimenpiteet radioaktiivisen kontaminaation leviämisen estämiseksi sekä ilmoittaa viranomaiselle havaitusta vuodosta. [25]

Ohjeistusta umpilähteen käytön jatkamiselle suositellun käyttöiän jälkeen ei ole.

4.5 Yhdysvallat

Yhdysvaltojen säteilyturvallisuusviranomainen on United States Nuclear Regulatory Commission (U.S.NRC). NRC valvoo ydinvoimalaitoksia ja radioaktiivisten aineiden käyttöä luvittamalla, tarkastuksilla ja vaatimusten toimeenpanolla.

NRC vaatii umpilähteiden tiiviyden testausta. Paikalleen asennettuja, teollisuudessa käytössä olevia mittalaitteita koskevassa ohjeessa tiiviyskokeita neuvotaan suorittamaan umpilähteen ja laitteen rekisteröintisertifikaatin mukaisella aikavälillä. Rekisteröimättömille umpilähteille tiiviyskoe tulee suorittaa 6 kuukauden välein. Umpilähteestä tai sen välittömästä läheisyydestä mittalaitteen sisältä mitattu kontaminaatio ei saa ylittää 185 Bq aktiivisuutta. Mikäli mitattu aktiivisuus ylittää annetun raja-arvon, tulee tapahetkeestä ilmoittaa viranomaiselle. Tällöin umpilähde poistetaan käytöstä. [26]

Ohjeistusta umpilähteen käytön jatkamiselle suositellun käyttöiän jälkeen ei ole.

4.6 Australia

Australiassa umpilähteisiin liittyvissä asioissa toimiva viranomainen on Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency (ARPANSA). ARPANSA on Australian valtion ensisijainen viranomainen säteilysuojelu- ja ydinturvallisuusasioissa.

ARPANSA:n ohjeiden mukaan umpilähteet tulee testata säännöllisin väliajoin tiiviiden varmistamiseksi. Näitä testejä ohjeistetaan kansainvälisessä standardissa ISO 9978 ja australialaisessa standardissa AS2243.4:1998 Safety in laboratories – Part 4 Ionizing radiation. Standardi AS2243.4 suosittelee tutkimaan jokaisen umpilähteen tai sen suojuksen vuosittain kontaminaation varalta esimerkiksi pyyhintäkokeella. Tämä standardi vaatii myös tiiviyskokeen suorittamista 10 vuoden välein. [27]

Edellä mainittujen standardien ohjeiden sekä rajallisten australialaisten umpilähdevalmistaja- ja umpilähdetestilaboratorioresurssien vuoksi ARPANSA on päättänyt:

1. Kun erillistä menettelytapaohjetta tai turvallisuusstandardia käytetään AS2243.4 -standardin sijaan, pyyhintäkoe suoritetaan menettelytapaohjeessa tai turvallisuusstandardissa määritellyin säännöllisin väliajoin.
2. Kun standardia AS2243.4 käytetään lupaehtona umpilähteen käytölle, pyyhintäkoe suoritetaan vuosittain. Pyyhintäkoe otetaan mahdollisimman läheltä umpilähdettä, mikäli umpilähteen pyyhkiminen ei ole mahdollista tai toivottavaa. Jos mitattu kontaminaatio ylittää 200 Bq, umpilähde on poistettava käytöstä. Jos kontaminaatiota havaitaan, mutta sen aktiivisuus on pienempi kuin 200 Bq, on pyrittävä varmistamaan, onko aktiivisuuden syy umpilähteen vuotaminen. Kaikkien pyyhintäkokeiden tulokset tulee kirjata umpilähteen tietoihin.
3. Australialaiset laboratoriot eivät tällä hetkellä tarjoa umpilähteiden tiiviyskoepalveluita. Toistaiseksi AS2243.4 -standardin vaatimat 10 vuoden välein suoritettavat tiiviyskokeet suoritetaan pyyhintäkokeilla. [27]

Suosittelun käyttöiän ylittäneet lähteet tulee tarkastaa tiiviiden osalta aiempaa lyhyemmällä tarkastusvälillä. Umpilähteille, joilla ei ole lähdevalmistajan määrittelemää suositeltua käyttöikää, ARPANSA on määritellyt suositellun käyttöiän seuraavasti:

1. 15 vuotta: ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{241}Am , $^{241}\text{Am/Be}$, ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{90}Sr (teollisuus)
2. 10 vuotta: ^{63}Ni , ^{90}Sr (lääketieteellinen, eläinlääketieteellinen)
3. 5 vuotta: muut umpilähteet, ellei käyttäjä voi perustella ARPANSA:lle pidempää käyttöikää

Ryhmän 1 (kaikki sovellukset) ja ryhmän 2 (siirrettävät tiheys-/kosteusmittarit ja paikalleen asennetut mittalaitteet) umpilähteiden käyttöä voidaan suositellun käyttöiän täytymisen jälkeen jatkaa vielä toisen suositellun käyttöiän verran ilman etukäteishyväksyntää. Tällöin pyyhintäkokeet tulee suorittaa 6 kuukauden (ryhmä 2: siirrettävät tiheys-/kosteusmittarit) tai 12 kuukauden välein (ryhmä 1: kaikki sovellukset ja ryhmä 2: pai-

kalleen asennetut mittalaitteet). Kaikkien pyyhintäkokeiden tulokset tulee kirjata umpilähteen tietoihin. Lisää käyttöaikaa yhden tai kahden suositellun käyttöiän yli voidaan myöntää tapauskohtaisesti. [27]

5. UMPILÄHTEIDEN KESTÄVYYTEEN JA KÄYTTÖIKÄÄN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Umpilähdekapseloiden kestävyys, käyttöikä ja tiiviyteen vaikuttaa tekijöitä niin kapselin sisä- kuin ulkopuoleltakin. Kapselin sisäpuolelta vaikuttavia tekijöitä ovat metalliin kohdistuva säteilyrasitus sekä radioaktiivisen aineen kemiallinen ja fysikaalinen olomuoto. Kapselin ulkopuolelta vaikuttavia tekijöitä ovat umpilähteen käyttöolosuhteet, käsittely ja valmistusviat. Lisäksi on käsitelty lyhyesti normaaleista käyttöolosuhteista poikkeava tilanne, tulipalo.

5.1 Valmistusviat

Umpilähteet valmistetaan kapseloimalla radioaktiivinen aine tiiviisti metallikapselin sisään. Gammalähteet kapseloidaan tyypillisesti kaksinkertaisiin kapseluihin, mutta alfa- ja beetalähteiden kapselointi voi olla myös yksinkertainen. Umpilähdekapselit ovat rakenteeltaan yksinkertaisia, joten valmistusvikojen tyyppejä on vähän. Todennäköisimmät virheet valmistuksessa liittyvät hitsisaumaan tai kapselin pinnanlaatuun.

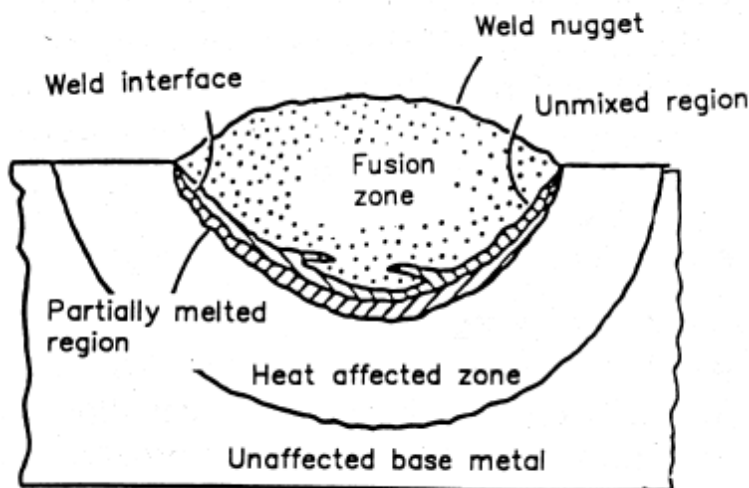
5.1.1 Hitsisauman laatu

Kuten aiemmin on todettu, umpilähteiden hitsausmenetelminä käytetään TIG-hitsausta ja laserhitsausta. Hitsaus vaikuttaa hitsattavaan materiaaliin monella tavalla esimerkiksi lämmöntuonnin, sisäisten jännitysten synnyn ja käytettävien lisäaineiden kautta. Käsillä hitsatessa myös inhimilliset virheet ovat mahdollisia, joita hitsauksen automatisointi luonnollisesti vähentää.

Sekä TIG-hitsaus että laserhitsaus voidaan suorittaa joko lisäaineen kanssa tai ilman. Hitsauslisäaine vastaa koostumukseltaan hitsattavaa materiaalia ja se syötetään hitsisulaan hitsauksen aikana. Lisäainetta käytettäessä on kuitenkin aina vaarana, että hitsisaumaan joutuu epäpuhtauksia, jotka voivat vaikuttaa hitsisauman laatuun negatiivisesti tai tehdä hitsisaumasta epätasalaatuisen. Lisäaineen epäpuhtaudet voivat esimerkiksi tuottaa kaasuja, jotka jäävät hitsisaumaan muodostaen huokosia. Ruostumattomien terästen tapauksessa huokosia aiheuttava kaasu on vety. [28]

Hitsauksen yhteydessä lämmöntuonti vaikuttaa hitsattavaan materiaaliin syntyvän muutosvyöhykkeen leveyteen ja näin ollen materiaalin mikrorakenteeseen. Suuri lämmöntuonti johtaa leveään muutosvyöhykkeeseen eli perusaineesta poikkeavaan mikrorakenteeseen. Käytettäessä TIG- tai laserhitsausmenetelmiä lämmöntuonti on pientä,

jolloin muutosvyöhyke jää kapeaksi ja mikrorakennemuutokset vähäisemmiksi korkeamman lämmöntuonnin hitsausmenetelmiin verrattuna. Tästä huolimatta muutosvyöhyke syntyy aina hitsatessa ja se vaikuttaa kappaleen ominaisuuksiin. Kuva 7 esittää hitsauksessa syntyvät muutosvyöhykkeen eri alueet.



Kuva 7. Hitsauksessa syntyvät muutosvyöhykkeen alueet [29]

Kuvassa keskellä näkyvä alue on hitsauksessa sulana ollut alue eli hitsiaine (Fusion zone). Tämä alue muodostuu sulavasta perusaineesta sekä mahdollisesti käytettävästä lisäaineesta. Se voi siis olla kemialliselta koostumukseltaan erilainen kuin hitsattava perusaine. Hitsiaineen ja muutosvyöhykkeen välissä oleva sularaja erottaa sulassa tilassa olleen hitsiaineen ja kiinteänä pysyneen, mikrorakennemuutoksia kokeneen muutosvyöhykkeen. Muutosvyöhykkeellä hitsauksen aikainen lämpötila on riittävän korkea aiheuttamaan kiinteän tilan faasimuutoksia, mutta pysyy sulamislämpötilan alapuolella. Muutosvyöhykkeellä lähimpänä hitsiainetta on karkearakeinen vyöhyke, jossa on tapahtunut kiteiden kasvua. Ferriittisissä teräksissä suuremmat kiteet ovat rakenteessa hauraampia, mutta austeniittisissä teräksissä haurausongelmaa normaalissa kuormituksessa ei ole. Seuraavana siirryttäessä kauemmas hitsiaineesta ja sularajasta on hienorakeinen vyöhyke, jossa kiteet ovat karkearakeista vyöhykettä pienempiä. Hitsauksen lämmöntuonti vaikuttaa muutosvyöhykkeen ja erityisesti rakeenkasvualueen leveyteen. Suurempi lämmöntuonti kasvattaa muutosvyöhykkeen leveyttä ja näin voi vaikuttaa materiaalin lujuusominaisuuksiin heikentävästi. Umpilähteiden valmistuksessa käytettävissä TIG- ja laserhitsausmenetelmissä lämmöntuonti hitsattavaan materiaaliin on kuitenkin pientä. [29; 30]

Hitsisaumaan voi syntyä virheitä niin inhimillisten virheiden kuin käytettävien hitsauslisäaineiden ja huokosten synnyn kautta. Huokokset ja muut epäjatkuvuuskohdat lisäävät korroosion vaarallisuutta umpilähteiden tiiviyden kannalta. Siksi umpilähteiden valmistuksen yhteydessä kapseloiden hitsisaumojen tarkastus esimerkiksi ultraääni- tai radiografisella tarkastuksella olisi suotavaa. Ei ole saatavilla tietoa, suorittavatko umpilähde-

valmistajat muunlaisia tarkastuksia umpilähteiden hitsisaumoille silmämääräisen tarkastelun lisäksi.

5.1.2 Pintavirheet

Umpilähdekapselin pintavirheet syntyvät tavallisesti valmistuksen yhteydessä, mutta joitakin virheitä voi syntyä myös esimerkiksi käsittelyn tai kuljetuksen yhteydessä. Pintavirheet saattavat joissakin olosuhteissa edesauttaa korroosion alkamista.

Ruostumattoman teräksen korroosio-ominaisuudet perustuvat teräksen pinnalle muodostuvaan suojaavaan passiivikalvoon. Ruostumattoman teräksen sisältämä kromi reagoi ilman hapen kanssa ja muodostaa teräksen pinnalle oksidikalvon. Oksidikalvo korjaantuu itsestään siihen syntyvistä pienistä naarmuista ja tekee näin ruostumattomasta teräksestä korroosionkestävän. Korroosio-ominaisuuksia heikentävät pintavirheet syntyvät tavallisesti tahattomasti valmistuksen yhteydessä. Tällaisia virheitä ovat esimerkiksi ruostumattoman teräksen pintaan uponneet rautapartikkelit (embedded iron), päästövärit (heat tint), hitsauksesta syntyvät roiskeet tai muut virheet, syvät naarmut sekä lika, kuten rasva, maali ja sormenjäljet. Nämä pintavirheet vahingoittavat passiivikalvoa ja teräksen pinta voi altistua paikalliselle korroosiolle. [31]

Pintavirheitä voi syntyä myös myöhemmin esimerkiksi umpilähteen asennuksen ja käsittelyn aikana. Umpilähdekapselit tulisi tarkastaa käsittelyn yhteydessä huolellisesti pintavirheiden osalta ja tarvittaessa esimerkiksi puhdistaa liasta, jotta paikalliselta korroosiolta voidaan mahdollisimman hyvin välttyä.

5.2 Mekaaninen rasitus

Umpilähteitä käytetään tavallisesti prosessiteollisuudessa radiometrisinä mittalaitteina, minkä vuoksi niiden käyttöolosuhteet voivat ikääntymisen näkökulmasta olla haastavat. Umpilähteet ovat prosessin aikana säteilysuojuksen sisällä suojassa suoralta mekaaniselta rasitukselta, kosteudelta ja kemikaaleilta, mutta voivat altistua niille esimerkiksi veden ja kemikaalien höyrystymisen tai säteilylähteen käsittelyn myötä. Jotkin mittalaitteet voivat sijaita myös ulkona ilman kunnollista sääsuojasta, jolloin umpilähteen altistuminen kosteudelle voi tulla kyseeseen. Lämpötila pysyy tavallisesti radiometristen mittalaitteiden sovelluksissa niin alhaisella tasolla, että sillä ei ole käytännön vaikutusta metalliseen umpilähdekapseliin.

5.2.1 Tärinä

Umpilähteitä käytetään erilaisissa prosessiteollisuuden sovelluksissa. Osa mittalaitteista voi olla kiinnitettynä sellaiseen kohtaan prosessia, jossa ne altistuvat jatkuvalla tärinällä. Vaikkei tärinä itsessään olisi riittävän voimakasta aiheuttamaan mekaanisia vaurioita

umpilähdekapselille, voi se edesauttaa esimerkiksi jännityskorroosiota tai materiaalin väsymistä tietyntilaisissa olosuhteissa.

Tärinä tai värähtely aiheuttaa ulkoista kuormitusta umpilähdekapselille, mikä voi aiheuttaa kapselin pintaan vetojännitystilän. Yhdessä mahdollisten sisäisten jännitysten sekä korrodoivan ympäristön kanssa tärinä voi johtaa hyvin vaaralliseen jännityskorroosion tilanteeseen. Austeniittisilla ruostumattomilla teräksillä jännityskorroosiota esiintyy hapettavissa kloridiliuoksissa. Tällainen käyttöympäristö on mahdollinen umpilähteiden tavallisissa teollisissa sovelluskohteissa. [32]

Väsyminen on materiaalin mekaanisen vaurioitumisen prosessi, joka aiheutuu materiaaliin kohdistuvasta jatkuvasta, syklistä kuormituksesta. Mekaaninen vaurio syntyy väsymisessä alhaisemmalla rasituksella, kuin mitä tavallisesti vaurion syntyy vaaditaan. Väsymismurtumaan johtavien säröjen alut ovat mikroskooppisia ja siten niiden havaitseminen on erittäin hankalaa. Nämä syyt yhdessä tekevät väsymisvaurioista erittäin hankalasti ennakoitavia ja havaittavia ja siksi erityisen vaarallisia. Austeniittiset ruostumattomat teräkset ovat jonkin verran parempia väsymisenkestossa ferriittisiin ja martensiittisiin ruostumattomiin teräksiin verrattuna. Toisaalta austeniittiset ruostumattomat teräkset ovat herkkiä termiselle väsymiselle korotettujen lämpötilojen sovelluksissa. Normaaleissa umpilähdekapseleiden teollisissa sovelluksissa lämpötilat eivät kuitenkaan nouse korkeiksi. [33]

5.2.2 Kuljetukset ja käsittely

Umpilähdekapselit eivät altistu suurelle mekaaniselle rasitukselle tavanomaisen käytön aikana. Tilanteet, joissa umpilähdekapselit voivat kuitenkin joutua esimerkiksi iskujen tai muiden hetkellisten, suurten rasitusten alaisiksi ovat umpilähteiden kuljetukset ja käsittely, esimerkiksi umpilähteiden vaihdon yhteydessä. Umpilähteitä kuljetetaan hyvin pakattuina, joten ne ovat hyvin suojattuja kuljetuksienkin aikana. Huolellinen kuljetus ei aiheuta umpilähdekapselille ylimääräistä rasitusta. Poikkeavissa tilanteissa kuitenkin rasitus on mahdollista esimerkiksi tärinän tai putoamisen seurauksena.

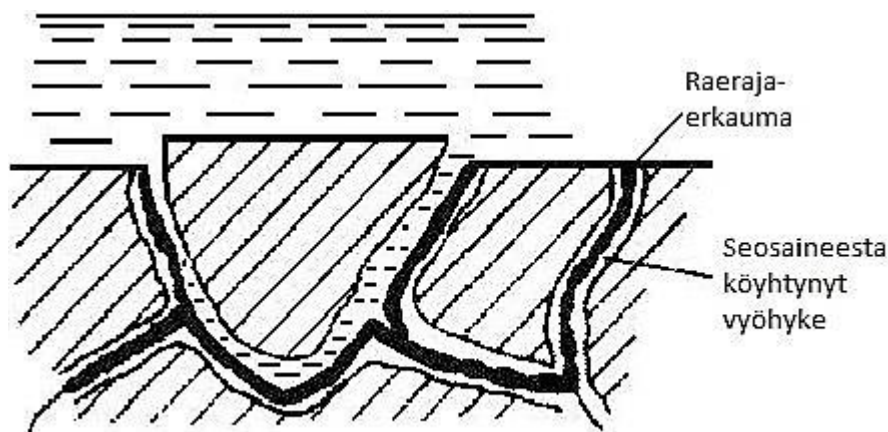
Umpilähdekapseleita tulee käsitellä erityistä huolellisuutta käyttäen. Liiallista voimaa tai kapselin pintaa vahingoittavien työvälineiden tai kemikaalien käyttöä tulee välttää irrotettaessa kapselia säteilysuojuksesta. Umpilähdekapselin tiiviynsä säilyminen on turvallisen käytön kannalta erittäin tärkeää, joten kaikkien mahdollisten korrodoitumista edesauttavien tilanteiden tunnistaminen on välttämätöntä. Ruostumattomissa teräksissä korroosio liittyy aina passiivikalvon vaurioihin, joten todennäköisimpiä paikkoja korroosiolle ovat pinnan virheet, kuten naarmut ja lika, tai materiaalin epäjatkuvuuskohdat, kuten hitsisaumat. Umpilähdekapselien käsittelyssä on aina riski pintavirheiden synty- miselle. [34]

5.3 Korroosio

Ruostumattomissa teräksissä esiintyviä korroosimuotoja ovat galvaaninen korroosio, raeraja- ja sularajakorroosio, piste- ja rakokorroosio, jännityskorroosio sekä kuumakorroosio. Umpilähteiden teollisissa sovelluksissa lämpötilat pysyvät alhaisina ja melko tasaisina, joten kuumakorroosio ei ole ongelma umpilähdekapselleille. Galvaaninen korroosio taas on osatekijä kaikissa paikallisen korroosion tapauksissa sekä mahdollista myös teräksisen umpilähdekapselin ja alumiinisen kapselinpidikkeen kosketuspinnassa. Tällöin ruostumaton teräs jalompana metallina toimii katodina, eli pysyy vahingoittumattomana. Kapselinpidike voi kuitenkin olla muutakin materiaalia kuin alumiinia. [35]

5.3.1 Raeraja- ja sularajakorroosio

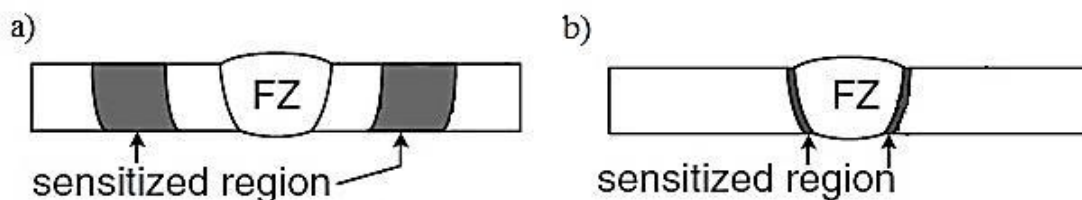
Raerajakorroosiolla tarkoitetaan metalliseoksen raerajoja pitkin tapahtuvaa syöpymistä. Metalliseoksen korroosio-ominaisuuksia heikentäviä yhdisteitä voi muodostua erilaisissa korkean lämpötilan käsittelyissä, kuten lämpökäsittelyn, korkean käyttölämpötilan tai hitsauksen yhteydessä. Ruostumattomilla teräksillä raerajakorroosio johtuu herkistymisestä. Herkistymistä tapahtuu austeniittisilla ruostumattomilla teräksillä 550–800 °C:n lämpötila-alueella esimerkiksi hitsauksen yhteydessä. Tällöin raerajoille muodostuu kromikarbideja (Cr_{23}C_6) ja vastaavasti raerajan vieressä oleva alue köyhtyy kromista. Kromiköyhä alue ei muodosta pinnalleen korroosiolta suojaavaa passiivikalvoa, joten se muodostuu anodiseksi alueeksi. Tämän vuoksi herkistynyt alue altistuu raerajakorroosiolle. Raerajakorroosion periaate on esitetty kuvassa 8. [36]



Kuva 8. Raerajakorroosio etenee metalliseoksessa raerajoja pitkin. [36]

Ruostumattoman teräksen herkistymistä ja raerajakorroosiota voidaan ehkäistä käyttämällä niukkahiilisiä laatuja, joiden hiilipitoisuus on $\leq 0,03$ m-%. Tavallisista umpilähteissä käytetyistä teräslaaduista 304L ja 316L ovat juuri tällaisia niukkahiilisiä laatuja. 321-laadussa hiilipitoisuus on korkeampi, mutta seosaineena käytetty titaani parantaa teräksen raerajakorroosionkestoa. [11; 37]

Raerajakorroosiota esiintyy hitsisauman muutosvyöhykkeellä hieman kauempana hitsisaumasta. Stabiloidut ruostumattomat teräkset eivät ole alttiita muutosvyöhykkeellä esiintyvälle raerajakorroosiolle, mutta myös ne voivat kärsiä herkistymisestä ja kromikarbidien muodostumisesta. Tällöin herkistynyt alue sijaitsee hitsisauman sularajalla. Tätä kutsutaan sularajakorroosioksi. Herkistymisalueet raeraja- ja sularajakorroosiossa on esitetty kuvassa 9. [38]



Kuva 9. Herkistyminen raeraja- ja sularajakorroosiossa. a) raerajakorroosio b) sularajakorroosio. FZ = Fusion Zone, hitsiaine. Muokattu lähteestä [38].

Sularajalla teräksen lämpötila nousee hitsauksen yhteydessä niin korkeaksi, että seostetun titaanimuodostamat titaanikarbidit liukenevat seokseen. Samalla alueella teräs jäähtyy hitsauksen jälkeen nopeasti, jolloin titaanikarbideja ei ehdi erkaantua teräkseen. Teräksen kuumentuessa jälleen herkistymislämpötila-alueelle (550–800 °C) ei titaanikarbideja muodostu, sillä lämpötila niiden muodostumiselle on liian matala. Näin ollen sularajan vieressä raerajoille erkaantuu kromikarbideja ja nämä raeraja-alueet altistuvat korroosiolle. [38]

Käsittelyn tai hitsauksen aikana tapahtunut herkistyminen voidaan poistaa ja teräs palauttaa normaaliin tilaan liuotushehkutuksella. Käsittely voidaan suorittaa niin niukka-hiilisiin kuin titaanilla stabiloiduille ruostumattomille teräksillekin. Liuotushehkutuksessa teräs kuumennetaan 1050–1150 °C:n lämpötila-alueelle ja jäähdytetään nopeasti. Liuotushehkutuksen aikana rakenteessa olevat erkaumat, kuten kromikarbidit liukenevat ja teräksen korroosio-ominaisuudet palaavat. Liuotushehkutus on kuitenkin harvinainen lämpökäsittely hitsauksen jälkeen, sillä herkistymistä on helpompi ehkäistä seostuksella ja niukkahiilisten teräslaatuojen valinnalla. Umpilähdekapseloiden tapauksessa liuotushehkutus on myös haastavaa tehdä, sillä hitsauksen jälkeen kapselin sisällä on jo radioaktiivinen pelletti. [39]

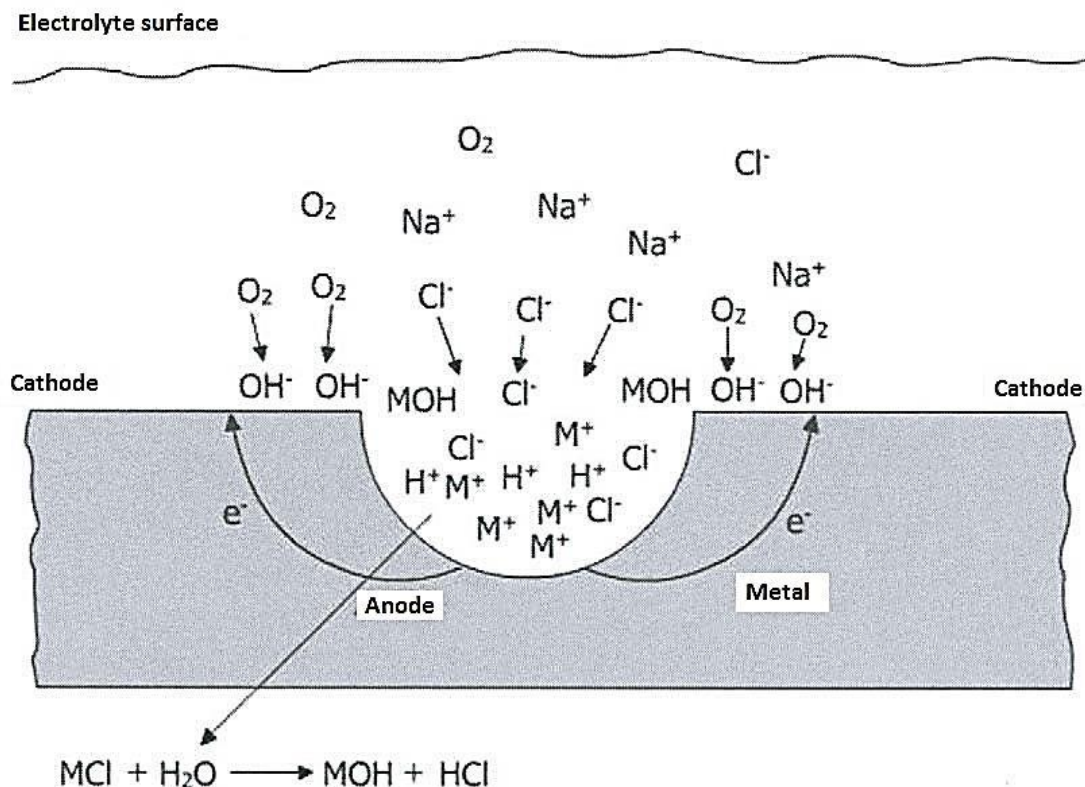
5.3.2 Piste- ja rakokorroosio

Pistekorroosio on paikallisen korroosion muoto, jossa metallin syöpyminen on keskittynyt pienille alueille. Metallin pintaan syntyy pistemäisiä, syviä ja vaikeasti havaittavia kuoppia, jotka kasvavat nopeasti. Pistekorroosio on erityisen vaarallista, koska se on vaikea huomata. Sen alkaminen kestää tavallisesti kuukausia. Metallin tavallisesti passivoituneessa tilassa, mutta suojaava oksidikerros on vaurioitunut paikallisesti ja pistekorroosio pääsee alkamaan. Rakokorroosiota tapahtuu ahtaissa raoissa, joihin elekt-

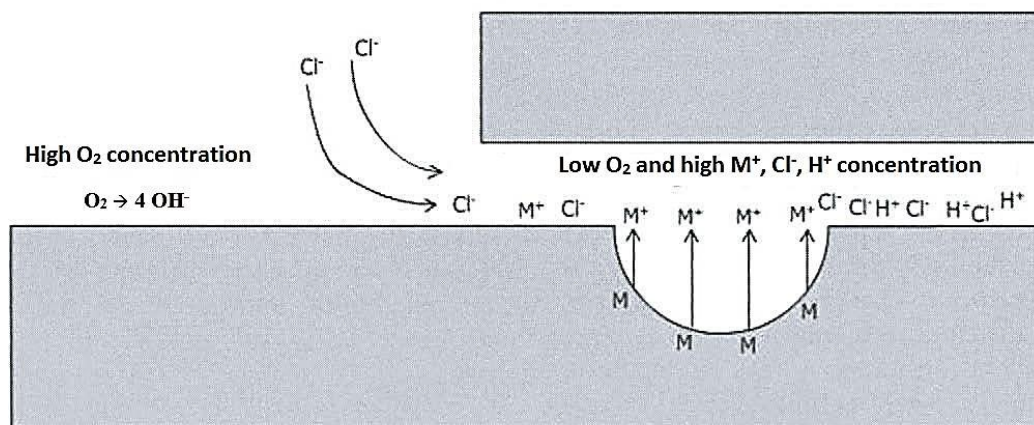
rolyyttiliuos pääsee tunkeutumaan, mutta liuoksen virtausnopeus on hyvin pieni. Kapeassa raossa hapenpuute estää pintaa suojaavan passiivikalvon muodostumisen. Tällöin suojautumaton pinta-ala on huomattavan pieni verrattuna passiivikalvolla suojattuun pinta-alaan, jolloin korroosionopeus kasvaa suureksi. Riittävän suurissa raoissa hapen pääsy teräksen pinnalle ei esty, joten myöskään rakokorroosiota ei tällöin esiinny. [36; 37]

Piste- ja rakokorroosiolle altteimpia metalleja ovat metallit, joiden korroosionkestävyys perustuu passiivikalvoon metallin pinnalla. Umpilähdekapseleissa käytettävät ruostumattomat teräkset ovat tällaisia metalleja. Molybdeeniseostus parantaa ruostumattomien terästen pistekorroosionkestoa. Molybdeenillä seostettu 316L-laatu on näin ollen 304L-laatua kestävämpi pistekorroosiotapauksissa. Piste- ja rakokorroosion riskiä lisää elektrolyyttiliuoksen virtausnopeuden lasku. Pistekorroosion riskiä lisäävät myös elektrolyyttiliuoksen lämpötilan ja happamuuden kasvu. [35] Umpilähdekapselien sovelluskohteiden lämpötilat pysyvät normaalioloissa riittävän matalina (n. +20–50 °C), jotta ne eivät merkittävästi kasvata pistekorroosion riskiä. Höyrystymisen seurauksena on mahdollista, että hapanta liuosta pääsee kontaktiin umpilähdekapselin kanssa ja tällöin liuos ei virtaa, vaan on seisova. Nämä olosuhteet lisäävät sekä piste- että rakokorroosion riskejä.

Piste- ja rakokorroosio alkaa tavallisesti metallin passiivikalvon rikkoontumisella Cl^- -ionin vaikutuksesta. Kloridi-ioneja voi tavallisesti päästä umpilähdekapselin pinnalle höyrystyneiden kemikaalien mukana. On kuitenkin myös mahdollista, että kloridi-ionien lähde on umpilähteen sisältämä $^{137}\text{CsCl}$, mikäli kapselin sisään pääsee kosteutta jostakin aiemmin syntyneestä, harmittomalta vaikuttaneesta raosta [40]. Kloridi-ioneja sisältävissä elektrolyyttiliuoksissa rakokorroosion mekanismi on samanlainen kuin pistekorroosiossa. Kloridi-ionit kerääntyvät syöpymäkohtaan ja saavat aikaan paikallisen, pistemäisen anodisen kohdan laajan katodisen passiivikalvon keskelle. Korroosionopeus muodostuu näin hyvin suureksi. Pistekorroosion periaate on esitetty kuvassa 10 ja rakokorroosion periaate kuvassa 11. [37]



Kuva 10. Pistekorroosion periaate. M^+ on metallikationi. [41]



Kuva 11. Rakokorroosion periaate. M^+ on metallikationi. [41]

Metalli liukenee positiivisina ioneina, kationeina (M^+), jotka taas vetävät puoleensa negatiivisia kloridi-ioneja, anioneja (Cl^-). Muodostuu metalliklorideja. Metalli-ionien väkvyseron takia syöpymiskohdan pohjalle siirtyy lisää vettä, joka hajottaa metallikloridit metallihydroksideiksi (MOH). Nämä nousevat syöpymän pinnalle ja hapettuvat. Lisää kloridi-ioneja kerääntyy syöpymiskohtaan ja korroosioreaktiot pysyvät käynnissä. Tavallisesti pistekorrosio pysähtyy saavutettuaan tietyn syvyyden, mutta ohuiden seinämien tapauksessa pistekorrosio voi jopa puhkaista seinämän. Umpilähdekapselien seinämät ovat tavallisesti melko ohuita, joten pistekorrosio voi edetä kapselissa seinä-

män läpi. Tällöin umpilähdekapselin tiiviys on uhattu ja vaarana voi olla radioaktiivisen aineen vuotaminen kapselin ulkopuolelle ja ympäristön kontaminaatio, mikäli radioaktiivinen aine on liukenevassa tai muuten helposti leviävässä muodossa. Rakokorroosion todennäköisin esiintymispaikka umpilähdesovelluksissa on umpilähdekapselin ja sen pidikkeen välissä. [37; 41]

Pistekorroosio alkaa vasta niin sanotun pistesyöpymäpotentiaalin ylittyttyä. Rajapotentiaalin arvo riippuu syöpyvästä metallista ja elektrolyyttiliuoksen pH-arvosta. Pistesyöpymäpotentiaalin määrittämiseen voidaan käyttää polarisaatiomittauksia, joissa pistesyöpymäpotentiaali määritellään polarisaatiokäyrien avulla. Polarisaatiomittauksia käsitellään tarkemmin luvussa 7.3. [36]

Eri teräslaatujen pistekorroosionkestävyyttä voidaan karkeasti arvioida pistekorroosioekvivalentin (Pitting Resistance Equivalent, PRE). PRE-vertailuarvo voidaan laskea seuraavasti:

$$PRE = Cr + 3,3 \times Mo + 16 \times N, \quad (1)$$

jossa Cr on kromin painoprosentti, Mo molybdeenin painoprosentti ja N typen painoprosentti kyseisessä terässeoksessa. Kromin, molybdeenin ja typen seostus kasvattaa piste- ja rakokorroosionkestoa teräksissä. PRE-vertailuarvoa luotettavampi tapa vertailla eri teräslaatujen pistekorroosionkestävyyttä on kriittisten pistekorroosiolämpötilojen (Critical Pitting Temperature, CPT) vertailu. Rakokorroosionkestävyyttä vertaillaan vastaavasti kriittisten rakokorroosiolämpötilojen (Critical Crevice Temperature, CCT) avulla. CPT ja CCT ovat kokeellisesti määritettyjä lämpötiloja, jotka kuvaavat piste- ja rakokorroosion alkamista tietyissä olosuhteissa. Arvojen määrittäminen sähkökemiallisella kokeella, jossa korrodoivaa liuosta lämmitetään ja samalla seurataan korroosion alkamista. Rakokorroosio on tyypillisesti pistekorroosiota voimakkaampaa ja tästä syystä CCT-lämpötilat ovat CPT-lämpötiloja matalampia. [42]

5.3.3 Jännityskorroosio

Jännityskorroosio tarkoittaa korroosion ja metallin pinnan vetojännityksen yhteisvaikutuksesta tapahtuvaa korrodoitumista. Jännityskorroosiossa metalliin kohdistuva jännitys voi olla sisäistä tai ulkoista jännitystä, mutta se on aina staattista. Syklinen jännitys liittyy luvussa 5.3.4 käsiteltävään korroosioväsymiseen. Ulkoinen jännitys voi johtua esimerkiksi staattisesta kuormasta tai paineesta, termisistä mittamuutoksista tai värähtelystä. Sisäisiä jännityksiä metallissa taas voivat aiheuttaa esimerkiksi hitsaus, lämpökäsittely tai kylmämuokkaus, ja niiden suuruutta on hyvin vaikea ennustaa. Korroosioolosuhteet ovat jännityskorroosiotapauksissa spesifiset kullakin materiaalilla. Austeniittisten ruostumattomien terästen jännityskorroosioolosuhteet on esitetty taulukossa 5. Metallin koostumus vaikuttaa oleellisesti sen jännityskorroosiotaipumukseen, mutta

koostumuksen lisäksi vaikuttavia tekijöitä ovat metallin mikrorakenne, dislokaatiokerros ja faasien stabiilisuus. [36; 41]

Taulukko 5. Austeniittisten ruostumattomien terästen jännityskorroosio-olosuhteet. Muokattu lähteestä [41].

Metal	Environment
Austenitic stainless steel (Fe–Cr–Ni)	Seawater NaCl + H ₂ O ₂ solutions Dichlorethane CCl ₄ solutions Chloroform Aniline chlorohydrate Ortho-dichlorobenzene Oxychlorobenzene Aluminum sulfate Na ₂ SO ₄ Sodium aluminate Ammonium carbonate KOH solutions NaOH solutions Molten NaOH

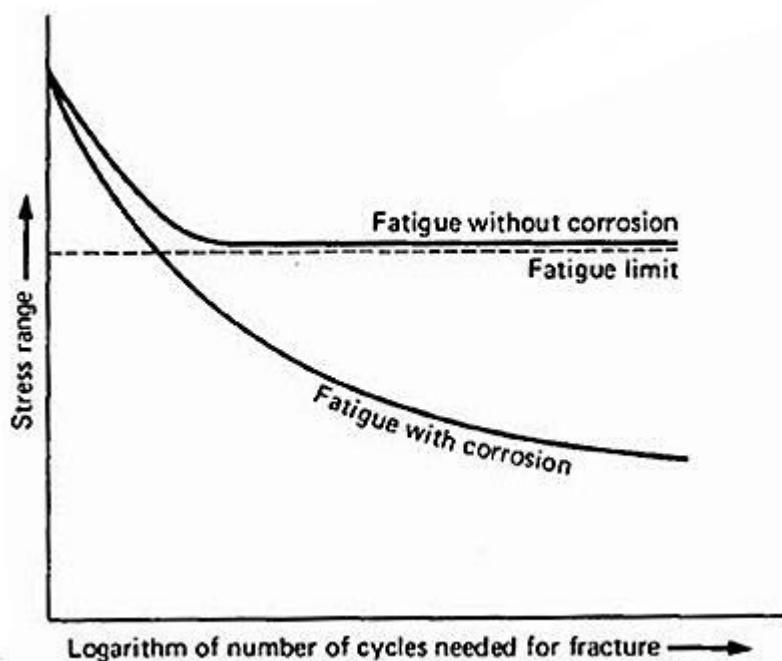
Jännityskorroosion tavallisimpia esiintymismuotoja ovat austeniittisten ruostumattomien terästen jännityskorroosio hapettavissa kloridipitoisissa ympäristöissä, niukkahiilisten kylmämuokattujen terästen lipeähauraus, vedyn diffuusiosta aiheutuva vetyhaurastuminen ja messingin varastorepeäminen. Kloridipitoisen ympäristön jännityskorroosio austeniittisissä teräksissä vaatii esiintyäkseen hapettavan ympäristön sekä usein myös korotetun lämpötilan. Taulukosta 5 nähdään kuitenkin, että austeniittisillä ruostumattomilla teräksillä jännityskorroosiota esiintyy myös muissa olosuhteissa kuin tavallisimmissa kloridipitoisissa ympäristöissä. Lipeähaurautta esiintyy emäksisissä olosuhteissa, joissa vetykonsentraatio on korkea. Vetyhaurastuminen johtuu atomaarisen vedyn diffuusiosta metalliin usein muokkaus- tai viimeistelyprosessien yhteydessä. Messingin varastorepeäminen taas tapahtuu ammoniakkin ja muiden tyyppä sisältävien korrodoivien aineiden ja messingin sisäisten jännitysten yhteisvaikutuksesta. [36; 41]

Jännityskorroosion mekanismi on hyvin monimutkainen ja kattavasta tutkimuksesta huolimatta vielä osittain tuntematon. Korroosion ja jännityksen osuudet jännityskorroosiomurtuman syntyyn vaihtelevat eri materiaalien ja korroosio-olosuhteiden välillä. Murtumat saattavat alkaa yllättäen ja ilman minkäänlaisia ulkoisia merkkejä korroosios- ta. Jännityskorroosiomurtuman aloittavat hiusmurtumat ovat tavallisesti niin pieniä,

ettei niitä voi havaita ilman erillistä tunkeumaneste- tai magneettijauhetaarkastusta. Murumat voivat edetä raerajoja pitkin tai rakeiden läpi metalliseoksesta, korroosioolosuhteista tai jännityksestä riippuen. Monen muun korroosionmuodon tapaan jännityskorroosio saa usein alkunsa valmistuksen tai käytön yhteydessä syntyneistä pinnan tai rakenteen virheistä tai muista epäjatkuvuuskohdista. Tällaisia paikkoja voivat olla esimerkiksi pintavirheet, hitsisaumat, raerajat, faasirajat ja piste- tai rakokorroosion aiheuttamat kuopat. Jännityskorroosion arvaamattomuutta ja vaarallisuutta lisää sisäisten jännitysten suuruuden vaikea ennustettavuus. Joissakin tapauksissa jännityskorroosion aiheuttava jännitys voi myös olla hyvin matala, esimerkiksi vain 10 % materiaalin myötörajasta. Lämpötilan kasvaessa jännityskorroosion nopeus kasvaa, mutta umpilähdekapselien tapauksessa käyttölämpötilat pysyvät tavallisissa käyttöolosuhteissa matalina. Poikkeavissa tilanteissa käyttölämpötilat voivat kuitenkin hetkellisesti nousta riittävän korkeiksi kasvattaakseen jännityskorroosionopeutta. [36; 37; 41]

5.3.4 Korroosioväsyminen

Korroosioväsymistapauksissa metalli vaurioituu syklisen jännityksen alaisena korroosioolosuhteissa. Syklistä jännitystä voi aiheuttaa esimerkiksi paineen vaihtelu, värähtely, lämpötilavaihtelut tai vaihtuva kuormitus. Vaurioituminen tapahtuu nopeammin tai alemmalla jännitystasolla kuin korroosiolle altistamattomissa olosuhteissa. Väsymiskäyttäytymistä korroosioolosuhteissa ja korroosiolle altistamattomissa olosuhteissa on kuvattu kuvassa 12. [37; 41]



Kuva 12. Väsyminen ja korroosioväsyminen: y-akselilla jännitys, x-akselilla kuormituskertojen lukumäärä [43]

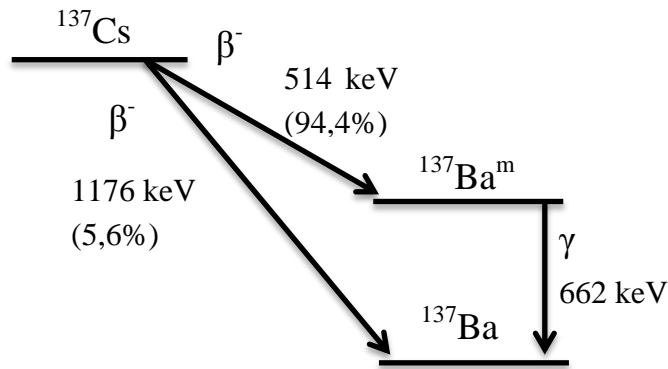
Kuvasta 12 nähdään, että ylemmässä, väsymistä ilman korrodoivia olosuhteita kuvaavassa käyrässä havaitaan selkeä väsymisraja. Väsymisrajaa pienemmillä jännitystasoilla metalli kestää murtumatta syklistä jännitystä. Korroosio-olosuhteissa taas tällaista selkeää väsymisrajaa ei ole. Syklisten kuormituskertojen lisääntyessä metallin kestävä jännitystaso voi laskea hyvinkin matalaksi. [36]

Kuten jännityskorroosiossa, myös korroosioväsymisessä korroosion ja jännityksen osuus murtuman synnyssä vaihtelee. Korroosio on määräävässä asemassa esimerkiksi sellaisissa tilanteissa, joissa myös muita paikallisen korroosion muotoja esiintyy. Esimerkiksi piste- tai rakokorroosion jo aiheuttamat pintavauriot voivat korroosioväsymisessä keskittää jännitystä, jolloin murtuma voi syntyä jo vähäisillä kuormituskerroilla. Austeniittinen ruostumaton teräs on altis pistekorroosiolle erityisesti kloridipitoisissa olosuhteissa, jolloin se altistuu helposti myös korroosioväsymiselle. Syklinen rasitus voi myös aiheuttaa paikallista korroosiota olosuhteissa, joissa metalli muuten altistuisi vain yleiselle korroosiolle. Syklinen rasitus voi rikkoa metallia suojaavan passiivikalvon, jolloin muodostuu anodinen, helposti korrodoituva alue. [36; 41]

5.4 Säteilyrasitus

Säteily vuorovaikuttaa metallien kanssa monin eri tavoin riippuen säteilytyypistä ja -lajista, säteilyn energiasta sekä säteilyaltistuksen kestosta. Tässä työssä käsiteltävä säteily on ionisoivaa säteilyä, joka on tyypiltään sähkömagneettista säteilyä tai hiukkassäteilyä. Alfa- ja beetasäteily ovat hiukkassäteilyä, joka läpäisee väliainetta huonosti. Sen vuoksi tässä luvussa keskitytään sähkömagneettiseen gammasäteilyyn ja tarkastellaan sen mahdollisia vaikutuksia ruostumattoman teräksen ominaisuuksiin.

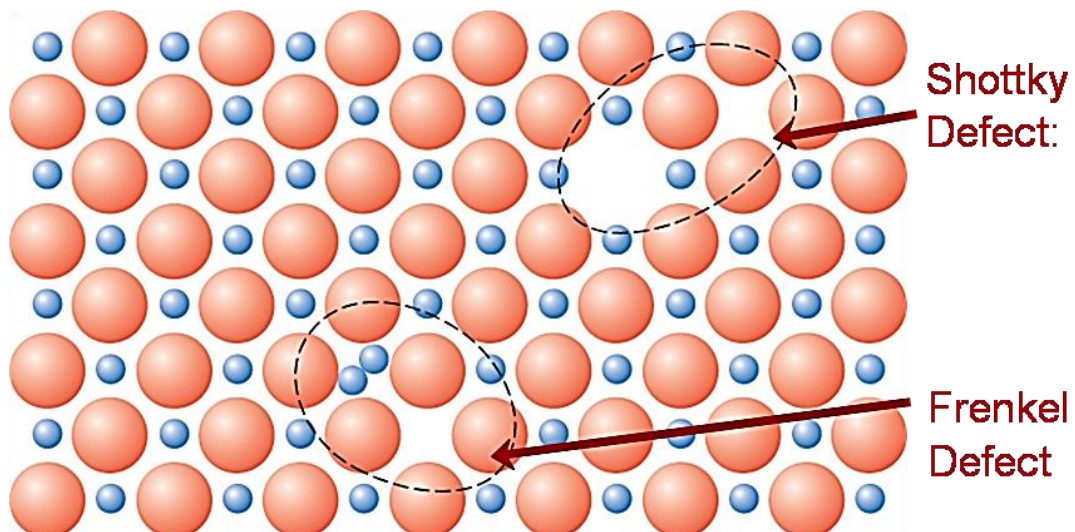
^{137}Cs -isotooppi on tyypillinen teollisuuden radiometrisissä sovelluksissa käytettävä gammasäteilijä. 94,4 % ^{137}Cs :stä hajoaa β^- -hajoamisella lyhytikäiseksi $^{137}\text{Ba}^m$ -nuklidiksi, minkä yhteydessä vapautuu 514 keV energiaa. β^- -hajoamisessa atomin ytimestä poistuu elektroni. $^{137}\text{Ba}^m$ -nuklidin puoliintumisaika on vain 2,55 minuuttia, jonka jälkeen se hajoaa stabiiliksi ^{137}Ba :ksi vapauttaen energialtaan 662 keV:n gammasäteen. Loput 5,6 % ^{137}Cs :sta hajoaa β^- -hajoamisella suoraan stabiiliksi ^{137}Ba :ksi vapauttaen 1176 keV energiaa. ^{137}Cs :n radioaktiivista hajoamista on havainnollistettu kuvassa 13. [6; 44]



Kuva 13. ^{137}Cs :n radioaktiivinen hajoaminen

Beetasäteily on heikosti läpäisevää, joten se ei pääse ulos kaksoiskapseloidusta ruostumattomasta teräskuoresta, joita ^{137}Cs -umpilähteissä tyypillisesti käytetään. Suurin osa beetasäteilystä absorboituu lasi- tai keraamipellettiin ja loput säteilystä pysähtyy ensimmäisen noin 0,1 mm:n matkalla sisemmän kapselin sisäseinämässä. Valtaosa syntyvästä gammasäteilystä kulkee umpilähdekapselin teräseinämien läpi, eikä näin ollen vaikuta kapseliin absorboituneeseen säteilyannokseen. [6]

Yksi säteilyn aiheuttama vauriomekanismi on atomien siirtyminen pois kidehilasta, eli niin sanotun PKA:n (Primary Knock-on Atom) syntyminen. Atomien siirtyessä pois kidehilasta syntyy vakanssi ja välisija-atomi. Vakanssilla tarkoitetaan kidehilan tyhjää aukkoa, josta puuttuu atomi tai ioni. Välisija-atomi taas on atomi, joka sijaitsee kidehilassa paikassa, joka normaalisti olisi tyhjä. Nämä ovat pistemäisiä hilavirheitä ja muodostavat lähekkäin sijaitessaan niin sanotun Frenkelin parin. Havainnekuva Frenkelin parista on esitetty kuvassa 14. [45]



Kuva 14. Havainnekuva Frenkelin parista [46]

Kuvan 14 alareunassa nähdään ympyröidyn alueen sisällä Frenkelin pari, jossa pienempi atomi on siirtynyt pois paikoiltaan kidehilasta välisija-atomiksi ja jättänyt entiselle

paikalleen vakanssin. Voimakas neutronisäteily saa aikaan kaskadireaktion, jossa Frenkelin pareja syntyy paljon ja materiaalin vaurioituminen on voimakkaampaa. Tämän kaskadireaktion seurauksena materiaali voi vahingoittua esimerkiksi kolojen tai heliumkuplien synnyn myötä. Heliumia voi syntyä kidehilaan neutronisäteilyn yhteydessä, kun metallin atomit absorboivat neutronin ja säteilevät alfahiukkasen. Alfahiukkanen on heliumydin, joka kaappaa itselleen herkästi elektroneja. Näin syntyy heliumatomeja, jotka voivat jäädä kidehilaan. Tässä työssä keskitytään kuitenkin sähkömagneettiseen gammasäteilyyn, jonka vaikutuksesta kidehilaan ei heliumia synny. [45]

PKA:n syntyminen vaatii paljon energiaa, ja alle 700 keV:n gammasäteet tai beetapartikkelit eivät ole riittävän suurienergisiä siirtämään atomeita paikoiltaan teräksen hilarakenteessa. Pieni osa lasi- tai keraamipelletistä ulos pääsevästä suurienergisisistä beetapartikkeleista voi teoriassa aiheuttaa PKA:n syntymisen umpilähdekapselin sisäseinässä. Beetasäteily eroaa kuitenkin esimerkiksi neutronisäteilystä siten, että elektronin ja atomin törmäyksessä syntyvän PKA:n energia ei ole riittävän suuri saamaan aikaan kaskadireaktiota vaan syntyvät Frenkelin parit ovat yksittäisiä. Tämä vaikutus myös rajoittuu vain noin 0,1 mm:n matkalle sisemmän kapselin sisäseinässä, joten kapselin mekaaniset ominaisuudet eivät oleellisesti heikenny beetasäteilyn vaikutuksesta. [6; 45]

Kaikki ^{137}Cs :n hajoamisessa syntyvät beetapartikkelit ovat riittävän suurienergisiä irrottamaan elektroneja atomiorbitaaleiltaan ja tuottamaan siten ioneja. Mahdolliset lasi- tai keraamipelletissä syntyvät PKA:t sekä ionisoituminen voivat yhdessä muodostaa sisäisiä jännityksiä pelletin rakenteeseen. Pitkään käytössä olleet lasi- tai keraamipelletit voivatkin olla alttiimpia murtumiselle tärinän tai iskun vaikutuksesta. Tämä ei kuitenkaan vaikuta pelletin liukoisuuteen. Ionisoituminen ei vaikuta teräskapselin ominaisuuksiin, sillä metalliatomit kiinnittyvät toisiinsa metallisidoksilla. Positiivisesti varautuneet metallikationit ovat säännöllisillä paikoillaan kidehilassa, ja niitä ympäröi vapaasti liikkuva elektronipilvi. Beetapartikkelien irrottamat elektronit korvautuvat helposti toisella elektronipilven elektronilla ja ionisoituminen on lyhytaikaista. Näin ollen umpilähdekapselin tiiviys ja käyttöturvallisuus eivät vaarannu ionisoitumisen vaikutuksesta, vaikka radioaktiivinen pelletti kapselin sisällä haurastuisikin. [6]

Muita mahdollisia gammasäteilyn vaikutuksia umpilähdekapseleihin ovat umpilähdekapselin pinnalle kerääntyneen nesteen tai höyryn radiolyysi hapettaviksi ja pelkistäviksi radikaaleiksi sekä säteilyn vuorovaikutus ruostumattoman teräksen passiivikalvon kanssa. Veden radiolyysissä ionisoiva säteily irrottaa elektroneja atomeiltaan ja rikkoo atomien välisiä kovalenttisia sidoksia aiheuttaen kemiallisia muutoksia. Näin muodostuu ioneja ja radikaaleja, joita veden radiolyysissä ovat esimerkiksi vety- ja hydroksidi-ionit (H^+ ja OH^-), vety- ja hydroksyyliiradikaalit (H^\cdot ja OH^\cdot) sekä vetyperoksidi (H_2O_2). Näistä erityisesti hydroksyyliiradikaali ja vetyperoksidi ovat erittäin reaktiivisia ja voimakkaasti hapettavia ja voivat aiheuttaa korroosiota. [47]

Säteilyn ja teräksen passiivikalvon vuorovaikutuksessa säteilyn energiaa voi absorboitua puolijohtavaan passiivikalvoon. Mikäli olosuhteet ovat riittävän hapettavat, syntyy elektroni–aukko-pareja johtavuus- ja valenssivöille varauksenkuljettajiksi. Elektronit ja aukot voivat liikkua materiaalissa, ja mikäli aukko liikkuu passiivisen oksidikerroksen ja liuoksen rajapintaan, jokin seuraavista kemiallisista reaktioista on mahdollinen:



Yllä esitetyistä reaktioista reaktio (2) on hapenmuodostusreaktio, (3) korroosioreaktio ja (4) passiivikalvon muodostusreaktio. Reaktioissa (3) ja (4) M on metalli. Reaktio (3) on melko tehoton, sillä passiivikalvo on hyvin ohut ja suurin osa gammasäteilyn energiasta kulkee kalvon läpi absorboitumatta. Reaktion vaikutus on siis itsenäisenä merkityksetön umpilähdekapselin korroosion kannalta. On mahdollista, että radiolyysi ja yllä esitetyt reaktiot toimivat yhdessä, jolloin radiolyysituotteet erottavat elektronin passiivikalvon valenssivyöltä ja reaktio (3) tai (4) voi alkaa. [47]

Ionisoivalla säteilyllä ei siis juurikaan ole suoria vaikutuksia umpilähdekapseliin, mutta se voi välillisesti vaikuttaa kapselin korroosio-ominaisuuksiin muuttamalla korroosioympäristöä radiolyysin välityksellä. Säteily voi myös vaikuttaa umpilähdekapselin sisällä olevan ei-metallisen pelletin kestävyyskykyyn ionisoimalla. Pelletin haurastuminen ei kuitenkaan vaaranna umpilähdekapselin tiiviyyttä.

5.5 Tulipalo

Umpilähdekapseli voi teollisuuden sovelluksissa altistua tulipalolle esimerkiksi umpilähteen käyttöpaikalla syttyvän tulipalon seurauksena. Tulipalo voi vaikuttaa umpilähdekapselin tiiviyyteen välittömästi tulipalon aikana erittäin korkeiden lämpötilojen kautta tai välillisesti altistaen kapselimateriaalin esimerkiksi korroosiolle tai faasimuutoksille.

5.5.1 Välittömät vaikutukset

Kuten luvussa 3.1 on esitelty, standardi ISO 2919: Radiation protection – Sealed radioactive sources – General requirements and classification käsittelee radioaktiivisten umpilähteiden yleisiä vaatimuksia ja luokituksia. Umpilähteen mekaanista suorituskkyä mitataan viiden mekaanisen testin testisetillä, jonka yksi osa on lämpötilatesti. Taulukossa 6 on esitetty lämpötilatesti standardin 2919 mukaisista mekaanisista testeistä. [19]

Taulukko 6. Standardin ISO 2919 mukainen lämpötilatesti. Muokattu lähteestä [19].

Test	Class								
	1	2	3	4	5	6	7	8	X
Temperature	No test	−40 °C (20 min) +80 °C (1 h)	−40 °C (20 min) +180 °C (1 h)	−40 °C (20 min) +400 °C (1 h) and thermal shock to 20 °C	−40 °C (20 min) +600 °C (1 h) and thermal shock to 20 °C	−40 °C (20 min) +800 °C (1 h) and thermal shock to 20 °C	Not used	Not used	Special test

Taulukosta 6 nähdään, että lämpötilatestissä umpilähdekapseli testataan sekä matalissa että korkeissa lämpötiloissa. Vaativimmassa, luokan 6, testissä kapseli jäädytetään −40 °C:seen alle 45 minuutissa ja pidetään tavoitelämpötilassa 20 minuuttia. Korkean lämpötilan testissä kapseli kuumennetaan standardissa määritellyn lämpötilakäyrän mukaisesti +800 °C:seen, pidetään tavoitelämpötilassa 1 tunti ja altistetaan lämpöshokille siirtämällä kapseli +20 °C:een veteen 15 sekunnissa. Mikäli ruostumattomasta teräksestä valmistettu umpilähdekapseli on luokiteltu lämpötilatestissä luokkaan 6, sen todennäköisyyttä vaurioitua tulipalossa pidetään matalana. [19; 48]

Teollisessa ympäristössä tapahtuvan tulipalon lämpötilaksi paloalueilla voidaan arvioida noin 1000 °C. Umpilähdekapselin sekä säteilysuojuksen ulkokuoren materiaalina käytettävän ruostumattoman teräksen sulamispiste on noin 1400–1500 °C, riippuen ruostumattoman teräksen koostumuksesta. Säteilysuojuksen sisällä oleva vuoraus on tavallisesti lyijyä, jonka sulamispiste on 327 °C. On siis hyvin mahdollista, että tulipalon yhteydessä joidenkin säteilysuojusten lyijyvuoraukset sulavat. Umpilähdekapselin ja säteilysuojuksen ulkokuoren oletetaan kestävän tulipalon lämpötilan sulamatta. Korotetussa lämpötilassa ruostumattoman teräksen lujuusominaisuudet ovat kuitenkin merkittävästi alemmat kuin tavanomaisessa, noin +20–50 °C:een käyttölämpötilassa. Taulukossa 7 on esitelty austeniittisen AISI 304 ruostumattoman teräslaadun lujuusominaisuuksia korotetuissa lämpötiloissa.

Taulukko 7. Austeniittisen AISI 304 ruostumattoman teräksen lujuus korotetuissa lämpötiloissa. Muokattu lähteestä [49].

Steel Temperature θ_2	Reduction factor (relative to E_a) for the slope of the linear elastic range $k_{E,0} = E_{a,0}/E_a$	Reduction factor (relative to f_y) for proof strength $k_{0.2p,0} = f_{0.2p,0}/f_y$	Reduction factor (relative to f_u) for tensile strength $k_{u,0} = f_{u,0}/f_u$	Factor for determination of the yield strength $f_{y,0}$ $k_{y,0}$
Grade 1.4301				
20	1,00	1,00	1,00	0,26
100	0,96	0,82	0,87	0,24
200	0,92	0,68	0,77	0,19
300	0,88	0,64	0,73	0,19
400	0,84	0,60	0,72	0,19
500	0,80	0,54	0,67	0,19
600	0,76	0,49	0,58	0,22
700	0,71	0,40	0,43	0,26
800	0,63	0,27	0,27	0,35
900	0,45	0,14	0,15	0,38
1000	0,20	0,06	0,07	0,40
1100	0,10	0,03	0,03	0,40
1200	0,00	0,00	0,00	0,40

Taulukossa 7 on esitetty muuntokertoimia korotetun lämpötilan ominaisuuksille verrattuna vastaavaan ominaisuuteen 20 °C:ssa. Punaisella merkityssä sarakkeessa esitetään muuntokerroin teräksen vetomurtolujuudelle. AISI 304 -teräs ei ole tyypillinen nykyisissä umpilähdekapsелеissa käytetty teräslaatu, mutta sen ominaisuudet ovat hyvin samankaltaiset umpilähdekapsелеille tyypillisten AISI 304L- ja 316L-teräslaatuojen kanssa. Vetomurtolujuuden sarakkeesta nähdään selkeästi, kuinka vetomurtolujuuden arvo pienenee lämpötilan kasvaessa. Esimerkiksi 800 °C:een lämpötilassa vetomurtolujuuden arvo on 27 % huoneenlämmössä (20 °C) mitatusta vetomurtolujuuden arvosta ja 1000 °C:een lämpötilassa enää vain 7 % huoneenlämmössä mitatusta vetomurtolujuuden arvosta. [49] Samansuuntaisia tuloksia vetomurtolujuuden muutoksille korotetuissa lämpötiloissa on esitetty myös lähteessä [48]. Umpilähdekapselin pysyessä korkeassa lämpötilassa paikallaan säteilysuojuksen sisällä ei siihen kuitenkaan kohdistu suuria vetojännityksiä, joten kapselin voidaan tällöin olettaa pysyvän ehjänä.

Korkeissa lämpötiloissa teräs pehmenee, jolloin sen plastisuus lisääntyy. Tämä tarkoittaa sitä, että teräksen kokemat muodonmuutokset korkeissa lämpötiloissa ovat palautumattomia muodonmuutoksia, eli teräs muokkautuu. Plastisessa materiaalissa voi tapahtua suuria muodonmuutoksia ilman, että materiaali murtuu. Tilanteessa, jossa tulipalossa kuumentunut umpilähdekapseli putoaisi korkealta säteilysuojuksesta kovalle lattialle, umpilähdekapseliin kohdistuisi iskumainen rasitus. Hauraat, eli matalan iskusitkeyden omaavat materiaalit kestävät heikosti tällaisia iskumaisia rasituksia ja murtuvat. Haurausilmiöt ovat kuitenkin tyypillisesti matalien lämpötilojen ongelmia, sillä korkeassa lämpötilassa esimerkiksi teräkset ovat pehmeitä ja sitkeitä. Taulukossa 8 on esitetty pitkäaikaisen kuumennuksen vaikutuksia ruostumattomien terästen huoneenlämpötilaiseen iskusitkeyteen.

Taulukko 8. Pitkäaikaisen kuumennuksen vaikutukset ruostumattomien terästen huoneenlämpötilaiseen iskutheyteen. Muokattu lähteestä [50].

Stainless Steel Type	Room-Temperature Charpy Keyhole Impact Strength													
	Unexposed		after 1000 hr at						after 10,000 hr at					
			900(482)		1050 (566)		1200°F (649°C)		900 (428)		1050 (566)		1200°F (649°C)	
			ft-lb	J	ft-lb	J	ft-lb	J	ft-lb	J	ft-lb	J	ft-lb	J
304	91	123	87	118	75	102	60	81	79	107	62	84	47	64
304L	82	111	93	126	76	103	72	98	85	115	71	96	63	85
309	95	129	120	163	85	115	43	58	120	163	51	69	44	60
310	75	102	—	—	48	65	29	39	62	84	29	39	2	3
316	80	108	86	117	72	98	44	60	87	118	49	66	21	28
321	107	145	101	137	90	122	69	94	88	119	72	98	62	84
347	56	76	60	81	55	75	49	66	63	85	51	69	32	43
405	35	47	—	—	36	49	26	35	—	—	39	53	34	46
410	33	45	—	—	41	56	27	37	39	53	3	4	21	28
430	46	62	—	—	32	43	34	46	1	1	3	4	4	5
446	1	1	—	—	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Taulukossa 8 on esitetty huoneenlämpötilaisia iskutheyden arvoja eri ruostumattoman teräksen laaduilla. Teräksiä on kuumennettu 482, 566 ja 649 °C:een lämpötiloissa 1000 tai 10 000 tunnin ajan. Lisäksi on esitetty huoneenlämpötilaisen iskutheyden arvot kuumentamattomille teräksille. Taulukossa on ympyröity punaisella 304L- ja 316-teräslaadut, jotka ovat lähellä tyypillisiä umpilähdekapselimateriaaleja. Taulukosta nähdään, että 1000 tunnin, 649 °C:een kuumennuksen jälkeen molempien teräslaadujen huoneenlämpötilaisen iskutheyden arvot ovat laskeneet kuumentamattomien terästen huoneenlämpötilaisista iskutheyden arvoista alle 50 %.

Tulipalon kaltaisessa tilanteessa teräksen altistusaika korkeille lämpötiloille on huomattavasti taulukossa 8 esitettyä altistusaikaa lyhyempi. Lämpötilan noustessa reaktionopeus kuitenkin kasvaa, joten arviota iskutheyden alenemisesta on vaikea tehdä ilman tarkempaa kokeellista määrittystä. Säteilysuojuksen sisällä umpilähdekapseli on hyvin suojattu iskumaiselta rasitukselta. Tilanteessa, jossa tulipalossa kuumentunut umpilähdekapseli putoaisi korkealta säteilysuojuksestaan kovalle lattialle, kapseli todennäköisesti muokkautuisi, mutta murtumiskäyttäytymistä on vaikea arvioida ilman kokeellista tutkimusta tai simulointia. Tarkempia arvioita pudotuksen vaikutuksista voi tehdä lujuuslaskennan ja FEM-ohjelmiston avulla.

Kapselin sisällä olevan radioaktiivisen aineen käyttäytyminen tulipalon lämpötilassa riippuu sen kemiallisesta ja fysikaalisesta olomuodosta. Tyypillisesti keraaminen pelletti pehmenee noin 1000 °C:ssa ja sulaa noin 1400 °C:ssa, joten sen voidaan olettaa kestävän myös tulipalon lämpötilassa. Vanhoissa umpilähteissä käytetyn cesiumkloridin sulamispiste taas on 646 °C, joten on mahdollista, että se sulaa tulipalon lämpötilassa. Monet sulat suolat, kuten cesiumkloridi, ovat voimakkaasti korrodoivia ja voivat heikentää teräskapselia ajan kuluessa. [48]

5.5.2 Välilliset vaikutukset

Tulipalon välillisiä vaikutuksia umpilähdekapseliin ovat erilaiset mikrorakenteen, faasi-en, mekaanisten ominaisuuksien tai korroosio-ominaisuuksien muutokset. Nämä ovat sellaisia muutoksia, joiden vaikutus näkyy mahdollisesti vasta myöhemmin umpilähdekapselin käytön jatkuessa.

Umpilähdekapselien materiaalina käytetään useimmiten austeniittista ruostumatonta terästä. Se on normaaleissa käyttöolosuhteissa korroosio-ominaisuuksiltaan hyvä, mutta lämpötila-alueella 550–800 °C se herkistyy, eli teräksen raerajoille muodostuu kromikarbidia (Cr_{23}C_6). Kromikarbidiin sitoutuu runsaasti kromia, jolloin sen viereen muodostuu kromiköyhä alue. Tällainen alue altistuu helposti raerajakorroosiolle. Ruostumattoman teräksen herkistymistä ja raerajakorroosiota voidaan ehkäistä käyttämällä niukkahiilisiä laatuja, joiden hiilipitoisuus on $\leq 0,03$ m-%. Umpilähdekapseleissa nykyisin käytettävät teräslaadut AISI 304L ja 316L ovat tällaisia niukkahiilisiä teräslaatuja, mutta kaikista vanhoissa umpilähdekapseleissa käytetyistä teräslaaduista ei ole saatavilla tarkempaa tietoa. Herkistymistä ja raerajakorroosiota on käsitelty yksityiskohtaisemmin luvussa 5.3.1. [36]

Ruostumattoman teräksen joutuessa kosketuksiin kuumen kaasun kanssa, voivat teräs ja kaasu reagoida keskenään. Reaktiot ovat riippuvaisia kaasun ja teräksen koostumuksista sekä lämpötilasta. Teräksen kumentuessa ilmassa, sen pintaan muodostuu oksidikerros eli se hapettuu. Normaaleissa käyttöolosuhteissa tämä oksidikerros toimii terästä suojaavana passiivikalvona, mutta korkeissa lämpötiloissa hapettuminen on jatkuvaa ja hapettunut kerros irtoilee hilseenä. Tällöin metalli syöpyy jatkuvasti. Myös vesihöyry voi aiheuttaa hapettumista korkeissa lämpötiloissa. Palokaasujen sisältämät rikki (rikki-dioksidi ja rikkivety), hiili (hiilimonoksidi ja hiilivety), kloori (kloorikaasu ja kloorivety) ja typpi voivat korkeissa lämpötiloissa niin ikään nostaa terästen korroosionopeutta. [35]

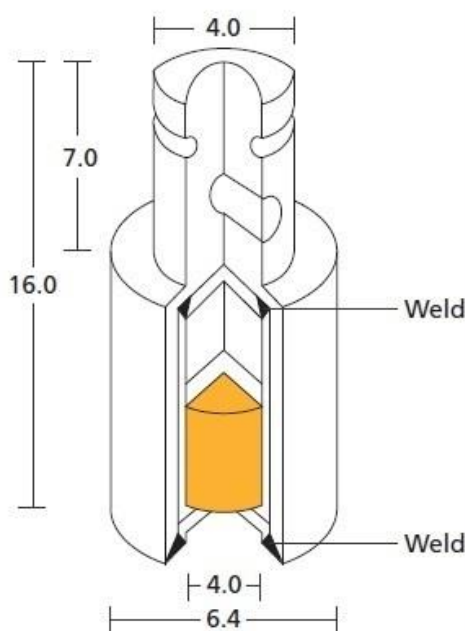
Sigmafaasi (σ -faasi) on kova ja hauras faasi, jota muodostuu 500–980 °C:n lämpötila-alueella. Tämä mikrorakenteen muutos voi tapahtua austeniittisissa tai ferriittisissä ruostumattomissa teräksissä sekä duplex-teräksissä. Sigmafaasin muodostuminen on kuitenkin hyvin paljon todennäköisempää runsaasti kromilla seostetuissa ferriittisissä ruostumattomissa teräksissä kuin alle 20% kromia sisältävissä austeniittisissä ruostumattomissa teräksissä, jollaisia tyypilliset umpilähdekapseleissa käytetyt teräslaadut ovat. Sigmafaasin muodostuminen austeniittisessä ruostumattomassa teräksessä γ -austeniitti-faasista on mahdollista, mutta melko epätodennäköistä. Austeniittinen ruostumaton teräs voi kuitenkin sisältää myös ferriittiä hitsisaumassa, sillä ferriitin muodostuksella pyritään välttämään hitsisauman kuumahalkeama. Ferriittinen faasi kuitenkin muuttuu austeniittia helpommin hauraaksi sigmafaasiksi korkeissa lämpötiloissa. Näin ollen sigmafaasin muodostuminen ja metallin haurastuminen ovat mahdollisia myös umpilähdekapseleissa käytetyillä austeniittisilla ruostumattomilla teräksillä, joskin se on melko epätodennäköistä. [51; 52]

6. TUTKITTAVAT MATERIAALIT

Tutkittaviksi materiaaleiksi hankittiin niin kutsuttuja ”dummy”-umpilähdekapsleita, jotka vastaavat rakenteeltaan ja materiaaleiltaan täysin vastaavia umpilähteitä, mutta sisältävät radioaktiivisen aineen sijaan kemiallisilta ja fysikaalisilta ominaisuuksiltaan mahdollisimman samanlaista korvaavaa ainetta [19]. Kapselimallit valittiin kapselimateriaalien perusteella, jotta tutkittavaksi ja verrattavaksi saatiin kahdesta eri ruostumattomasta teräslaadusta valmistettuja näytteitä. Kapselit valmisti Eckert & Ziegler Nuclitec GmbH. Tämän luvun alaluvut on nimetty kapselimateriaalien mukaan informatiivisuuden vuoksi.

6.1 AISI 316L -kapselit

Tässä työssä käytetyt AISI 316L -teräksestä valmistetut umpilähdekapselit ovat hyvin pieniä pistemäisiä säteilylähteitä. Kapselit ovat halkaisijaltaan noin 6,4 mm:n ja korkeudeltaan noin 16 mm:n kokoisia. Näytekapseli on esitetty kuvassa 15. Lisäkuvia tutkittavasta kapselistä on liitteessä A.



Kuva 15. AISI 316L -kapseli: piirros [53] ja valokuva

Kuvan 15 mukaisessa umpilähdekapselissa radioaktiivinen aine, ^{137}Cs , on keraamisessa muodossa kaksoiskapseloinnin sisällä. Tutkittavassa ”dummy”-kapselissa radioaktiivista ainetta ei ole. Tietoja tutkittavista AISI 316L -kapseleista on koottu taulukkoon 9.

Taulukko 9. Tutkimusaineistona käytettyjen AISI 316L -umpilähdekapseleiden tiedot

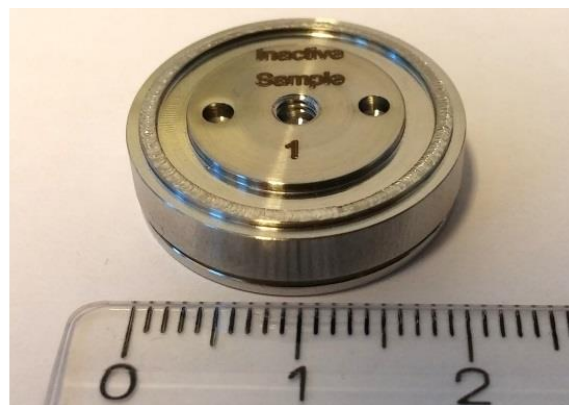
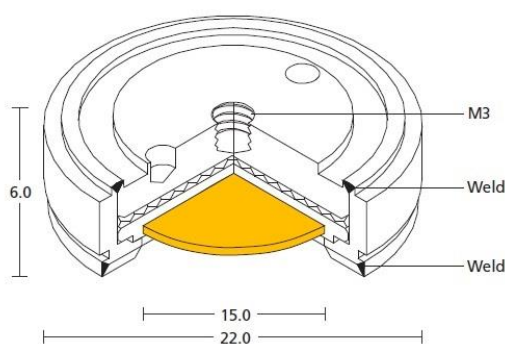
Lukumäärä (kpl)	Kapseli-malli	Kapseli-materiaali	ANSI/ISO luokittelu	Nuklidi	Sovellukset
5	VZ-79/1	AISI 316L	C66646	^{137}Cs	- Pinnankorkeusmittaus - Tiheysmittaus

Tutkittavan kapselimallin ISO-luokittelu on C66646, joka tarkoittaa erittäin hyvää suorituskkyä mekaanista kestävyyttä mittaavissa testeissä. Kapseli suoriutuu jokaisessa mekaanisessa testissä vaativimman luokan testistä säilyttäen tiiviytensä. Umpilähdekapseleille suoritettavat mekaaniset testit ja niiden luokitukset on esitelty aiemmin taulukossa 4. Testeistä on saatavilla tarkempaa tietoa standardissa ISO 2919: Radiation protection – Sealed radioactive sources – General requirements and classification. Mekaanisten testien läpäisy varmistetaan suorittamalla kapselille standardin ISO 9978: Radiation protection – Sealed radioactive sources – Leakage test methods mukaiset tiiviyskokeet jokaisen mekaanisen testin jälkeen. Valmistajan määrittelemät tiiviyskokeet VZ-79/1-malliselle ^{137}Cs -umpilähteelle ovat pyyhintäkoe, upotuskoe ja kuplienmuodotuskoe (bubble test) [53].

Näytekapseleiden valmistajan mukaan kyseisten kapseleiden tyypilliset teollisuussovellukset ovat pinnankorkeusmittaus ja tiheysmittaus. Tavanomaisessa käytössä kapselit eivät siis altistu mekaanisten testien kaltaisille olosuhteille, joten niiden voidaan olettaa säilyvän tiiviinä suositellun käyttöikänsä ajan. Valmistajan määrittelemä suositeltu käyttöikä VZ-79/1-malliselle ^{137}Cs -umpilähteelle on 15 vuotta [53].

6.2 AISI 321 -kapselit

Työssä käytetyt AISI 321 -kapselit ovat pieniä, levymäisiä säteilylähteitä. Kapselit ovat halkaisijaltaan noin 22 mm:n ja korkeudeltaan noin 6 mm:n kokoisia. Näytekapseli on esitetty kuvassa 16. Lisäkuvia tutkittavasta kapselistä on liitteessä B.



Kuva 16. AISI 321 -kapseli: piirros [53] ja valokuva

Kuvan 16 mukaisessa umpilähdekapselissa radioaktiivinen aine, ^{90}Sr , on keraamisessa muodossa yksinkertaisen ruostumattoman teräskapselin sisällä. Tutkittavassa ”dummy”-kapselissa radioaktiivista ainetta ei ole. Kapselissa on myös ohut 0,1 mm:n ruostumattomasta teräksestä valmistettu ikkuna, jotta beetasäteily pääsee kapselistä ulos. Tietoja tutkittavista AISI 321 -kapseleista on koottu taulukkoon 10.

Taulukko 10. Tutkimusaineistona käytettävien AISI 321 -umpilähdekapselien tiedot

Lukumäärä (kpl)	Kapseli-malli	Kapseli-materiaali	ANSI/ISO luokittelu	Nuklidi	Sovellukset
5	VZ-2453/1	AISI 321	C43324	^{90}Sr	Paksuusmittaus (paperi, muovi)

Tutkittavan kapselimallin ISO-luokittelu on C43324, joka tarkoittaa kohtalaista suorituskyyä mekaanisista kestävyyttä mittaavissa testeissä. AISI 321 -kapselin vaatimattomampi luokittelu verrattuna AISI 316L -kapseliin selittyy pääasiassa AISI 321 -kapselin ohuella teräsikkunalla sekä mahdollisesti AISI 321 -kapselin yksinkertaisella kapseloinnilla AISI 316L -kapselin kaksoiskapselointiin verrattuna. Valmistajan määrittelemät tiiviyskokeet mekaanisten testien jälkeen VZ-2453/1-malliselle ^{90}Sr -umpilähteelle ovat pyyhintäkoe ja upotuskoe [53].

Näytekapselien valmistajan mukaan kyseisten kapselien tyypilliset teollisuussovellukset ovat paperin ja muovin paksuusmittaukset. Tavanomaisessa käytössä kapselit eivät siis altistu mekaanisten testien kaltaisille olosuhteille, joten niiden voidaan olettaa säilyvän tiiviinä suositellun käyttöikänsä ajan. Valmistajan määrittelemä suositeltu käyttöikä VZ-2453/1-malliselle ^{90}Sr -umpilähteelle on 10 vuotta [53].

7. TUTKIMUSMENETELMÄT

Luvussa 6 esitellyille ”dummy”-umpilähdekapseleille suoritettiin materiaalikarakterisointitutkimuksia liittyen näytteiden kemialliseen koostumukseen, mikrorakenteeseen, polarisaatiokäyttäytymiseen sekä hitsisaumojen laatuun. Tutkimukset suoritti VTT Expert Services Oy Espoossa. Tässä luvussa esitellään käytetyt tutkimusmenetelmät.

7.1 Kemiallisen koostumuksen määrittäminen

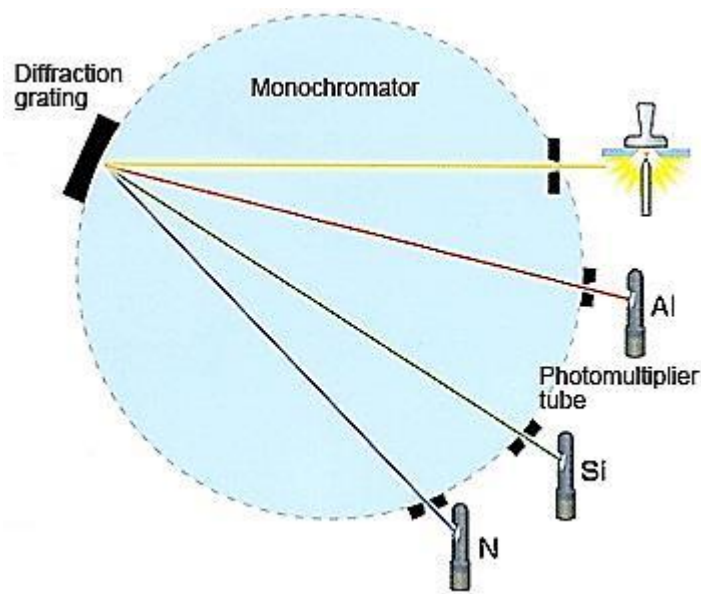
Ensisijainen näytekapseleiden kemiallisen koostumuksen määrittäminen oli optinen emissiospektrometri (OES). AISI 316L -näytteen kemiallista koostumusta ei kuitenkaan sen pienen koon takia voitu luotettavasti analysoida OES-analyysillä, vaan sen analysoimiseen käytettiin SEM-EDS-analyysiä.

7.1.1 OES-analyysi

Optinen emissiospektrometria (OES) perustuu alkuaineiden elektronien hetkelliseen virittymiseen ja niiden emittoiman valon aallonpituuteen. OES-analyysissä hyödynnetään näkyvän valon spektriä ja osaa ultraviolettivalon spektristä. Alue vastaa 130–800 nm:n aallonpituusalueita. [54; 55]

OES-analyysilaitteet koostuvat kolmesta osasta: virtalähteestä, optisesta järjestelmästä ja tietokoneesta. Virtalähdettä käytetään näytteen alkuaineatomien virittämiseen, jotta ne emittoivat jokaiselle alkuaineelle tyypillisen aallonpituuden valoa. Analysoitavan näytteen pinta hiotaan puhtaaksi ja siihen kohdistetaan korkeaenerginen sähköinen tai sähkömagneettinen pulssi. Näyte on analysoinnin aikana suojattu inertillä suojakaasulla, argonilla. Laitteistossa synnytetään sähköinen potentiaali näytteen ja elektrodin välille, joka synnyttää sähköpurkauksen. Tämä sähköpurkaus kuumentaa ja höyrystää näyttemateriaalin pintaa ja virittää näytteen atomeja. Nämä virittyneet atomit emittoivat jokaiselle alkuaineelle tyypillistä valoaan, valon spektriviivoja, jotka analysoidaan. [54; 55]

Höyrystyneestä näytteestä emittoitunut valo kulkeutuu spektrometriin, jossa se erotellaan alkuainekohtaisiksi aallonpituuksiksi. Näiden eri aallonpituuksien intensiteetit mitataan. Intensiteetit ovat suhteellisia alkuaineiden pitoisuuksiin mitatussa näytekappaleessa. Lopuksi tietokone käsittelee intensiteettitiedot ennalta määritellyn kalibroinnin avulla ja tuottaa tiedon alkuaineiden pitoisuuksista. OES-analyysin periaate on esitetty kuvassa 17. [56]



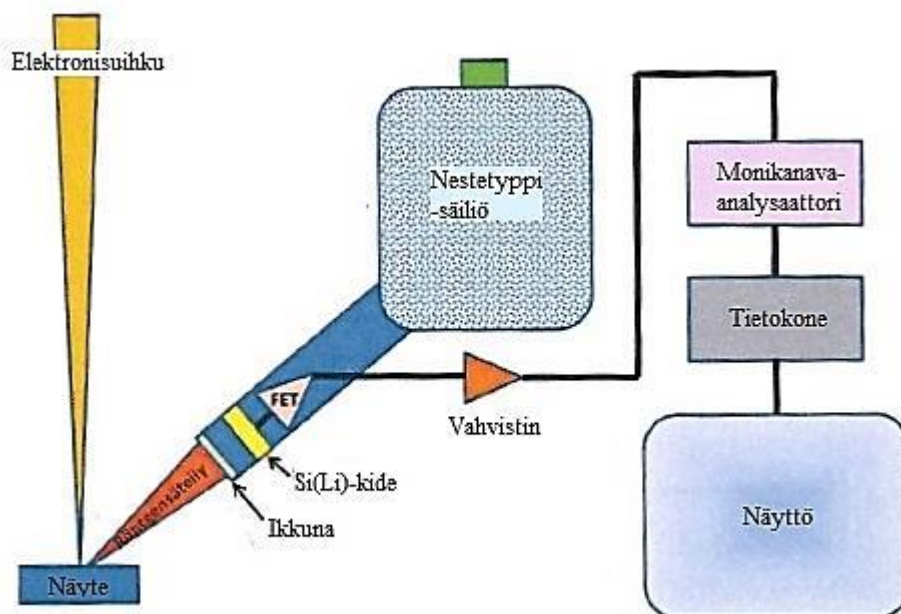
Kuva 17. OES-analyysin periaatekuva. Tutkittava näyte on oikealla ylhäällä. [56]

Kuvassa 17 tutkittava näyte on oikealla ylhäällä. Eri alkuaineiden emittoima spektri jaetaan kuvassa vasemmalla sijaitsevalla diffraktiohilalla. Tämän jälkeen ilmaisimet mittaavat niille tulevien spektrien intensiteetit, joista saadaan tieto eri alkuaineiden pitoisuuksista näytteessä. [56]

7.1.2 SEM-EDS-analyysi

SEM-EDS-analyysissä käytetään pyyhkäisyelektronimikroskoopin (Scanning Electron Microscope, SEM) energiadisersiivistä analyysiä (Energy-dispersive X-ray spectroscopy, EDS). Pyyhkäisyelektronimikroskopiaa esitellään tarkemmin luvussa 7.2.1.

SEM-EDS-analyysi perustuu analysoitavan näytteen alkuaineatomien emittoimien röntgensäteiden energian ja intensiteetin mittaukseen. Jokaisen eri alkuaineen emittoimilla röntgensäteillä on niille ominainen energia. Intensiteetin perusteella taas määritellään alkuaineen pitoisuus näyttemateriaalissa. Kevein EDS-tunnistimella tunnistettavissa oleva alkuaine on boori. Boori ja sitä raskaammat alkuaineet voidaan siis tunnistaa EDS-analyysillä, mutta keveiden alkuaineiden pienien pitoisuuksien kvantitatiivinen määrittäminen ei ole luotettavaa. [57] Tämän vuoksi hiili ja happi on jätetty pois SEM-EDS-analyysin tuloksista luvussa 8.1. EDS-laitteiston periaatekuva on esitetty kuvassa 18.



Kuva 18. EDS-laitteiston periaatekuva. Muokattu lähteestä [57].

Kuvasta 18 nähdään, että tutkittavaa näytettä suihkutetaan elektronisuihkulla. Näytteestä emittoituu röntgensäteitä, jotka analysoidaan EDS-laitteistolla. Laitteisto sisältää pii-litium-kiteen (Si(Li)-kide), joka on puolijohdemateriaalia. Röntgensäteet aiheuttavat kiteessä elektroni-aukko-pareja. Nämä parit taas muodostavat energialtaan röntgensäteisiin verrannollisia pulsseja, jotka siirtyvät vahvistimen kautta monikanava-analysaattorille. Monikanava-analysaattorissa pulsseista muodostuu spektri, joka energialtaan vastaa kalibroinnin jälkeen eri alkuaineiden energioiden arvoja. Pulssien määrä taas on verrannollinen röntgensäteilyn intensiteettiin eli eri alkuaineiden pitoisuuksiin tietyssä kohdassa näytettä. [57]

7.2 Mikrorakennetarkastelu

Näytteille tehtiin mikrorakennetarkastelu, jotta voitiin selvittää tarkemmin terästen mikrorakenteet, raekoot sekä mahdollinen herkistymisestä johtuva kromikarbidien muodostuminen hitsisaumojen alueella ja niiden läheisyydessä. Näytteet tutkittiin optisella mikroskoopilla ja pyyhkäisyelektronimikroskoopilla (SEM).

7.2.1 Pyyhkäisyelektronimikroskopia (SEM)

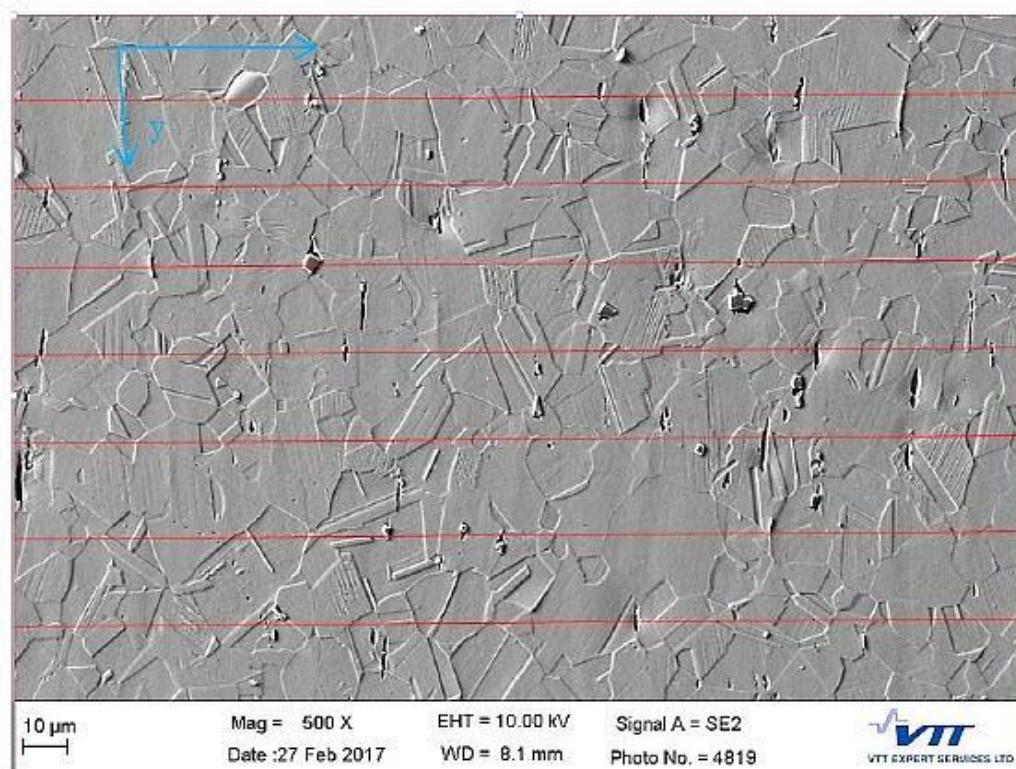
Pyyhkäisyelektronimikroskoopin (SEM) toiminta eroaa optisesta mikroskoopista siten, että siinä käytetään näkyvän valon sijasta elektronisuihkua. SEM-analyysin erotuskyky ja syvyystarkkuus ovat optiseen mikroskopiaan verrattuna erinomaiset. Pyyhkäisyelektronimikroskoopin periaate on esitetty kuvassa 19.

7.2.2 Raekokomääritys

Näytteiden keskimääräiset raekoot määritellään keskimääräisen leikkausvälin menetelmän avulla (Average Grain Intercept method). Tässä menetelmässä mikrorakennekuvan (SEM-kuva) päälle piirretään tietyn mittaisia viivoja ja kuvasta lasketaan, kuinka monta kertaa materiaalin raeraja leikkaa viivan kanssa. Tarkastelu suoritetaan sekä x- että y-suuntaan. Mikrorakenteen keskimääräisen raekoon määrittämiseen käytetään kaavaa

$$d = \frac{l}{n}, \quad (5)$$

jossa d on raekoko, l on viivan pituus ja n viivan ja raerajan leikkauskohtien lukumäärä. Kuvassa 20 on esitetty esimerkki raekokomäärityksestä x-suunnassa.

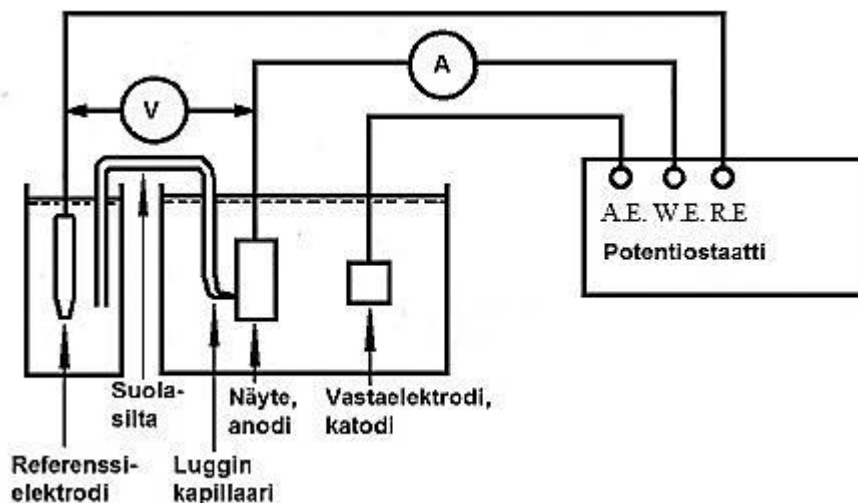


Kuva 20. Esimerkki raekokomäärityksestä x-suunnassa keskimääräisen leikkausvälin menetelmällä (Liite C)

7.3 Polarisaatiomittaukset

Polarisaatiomittaukset ovat sähkökemiallisia korroosiotutkimusmenetelmiä, joita käytetään metallien korroosiomekanismien tutkimiseen, korroosio-ominaisuuksien vertailuun ja korroosionopeuden määrittämiseen. Nämä tutkimusmenetelmät perustuvat elektrodeilla tapahtuviin polarisaatioilmiöihin. Polarisaatio tarkoittaa tasapainotilaisen elektrodin ja liuoksen välisen potentiaalieron muutosta. [58]

Polarisaatiokäyrä on tutkittavan näytteen ja valitun elektrolyytin muodostaman systeemin potentiaali-virrantiheys-riippuvuus. Käyrän mittaus suoritetaan potentiostaattilaitteistolla, joka koostuu mittakennosta, mittakennon elektrodien välistä potentiaalia mittaavasta ja säätävästä sähköisestä potentiostaattiyksiköstä sekä tuloksia käsittelevästä tietokoneesta. Potentiostaattilaitteiston periaate on esitetty kuvassa 21. [58]



Kuva 21. Potentiostaattilaitteiston periaate. Elektrodit: Vastaelektrodi (A.E., auxiliary electrode), näyte (W.E., working electrode), referenssielektrodi (R.E., reference electrode). Muokattu lähteestä [58].

Mittakennossa on kolme elektrodia: näyte-elektrodi, vastaelektrodi ja referenssielektrodi. Lisäksi laitteistossa voi olla lämpömittari huoneenlämmöstä poikkeavia polarisaatiomittauksia varten sekä kaasun syöttö ja poisto. Polarisaatiomittauksessa potentiostaatti syöttää virtaa vastaelektrodin ja näytteen muodostamaan piiriin. Yleisimmin käytetty vastaelektrodi on platinaelektrodi. Potentiaalin määrittämiseen käytetään referenssielektrodiä, koska näytteen ja elektrodin rajapinnan potentiaaliero ei voida suoraan mitata. Referenssielektrodi on usein kyllästetty kalomelielektrodi tai hopea/hopeakloridielektrodi (Ag/AgCl). [58; 59]

Polarisaatiokäyrien mittaukseen on kaksi tapaa. Potentiostaattisessa menetelmässä potentiaalia muutetaan portaittain ja virran annetaan tasaantua eri potentiaaleissa tietyn vakioajan. Potentiodynaamisessa menetelmässä potentiaalia muutetaan vakionopeudella jatkuvasti. Mittauksen aikana syntyy korroosiotuotteita, joiden vuoksi virran asettuminen tasapainoon voi viedä paljon aikaa. Potentiaalin muutosnopeus ja -tapa vaikuttavat polarisaatiokäyrän muotoon, miksi onkin oleellista, että vertailtaessa materiaalien korroosiokäyttäytymistä polarisaatiokäyrien avulla, käytetään kaikissa mittauksissa samaa potentiaalin muutosnopeutta. [58]

7.4 Hitsisaumojen NDT-tarkastus

NDT-tarkastus (Non-Destructive Testing) on ainetta rikkomatonta testausta. Tarkastusmenetelminä käytettiin tunkeumanestetarkastusta ja radiografista tarkastusta.

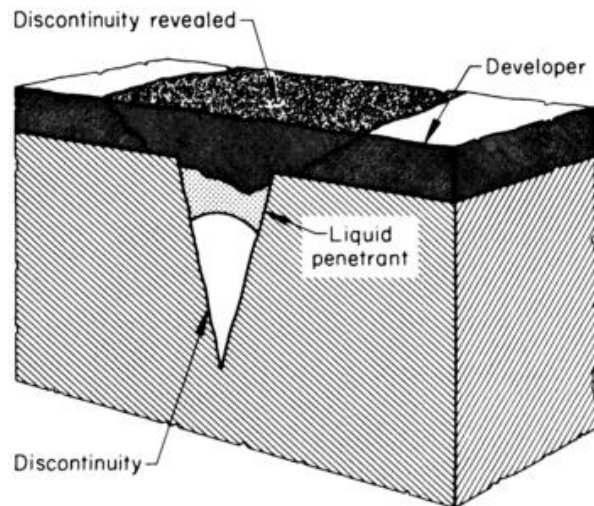
7.4.1 Tunkeumanestetarkastus

Tunkeumanestetarkastus kuuluu NDT-tarkastusten pintatarkastusmenetelmiin. Pintatarkastusmenetelmillä voidaan havaita materiaalin pintaan avautuvat viat, esimerkiksi säröt, halkeamat ja avohuokoset.

Tunkeumanestetarkastuksen vaiheet ovat:

1. Esipuhdistus
2. Tunkeumanesteen levitys
3. Tunkeumanesteen vaikutusaika
4. Tunkeumanesteen poisto
5. Kehitteen levitys
6. Kehitteen vaikutusaika
7. Tarkastus
8. Puhdistus

Esipuhdistusvaiheessa tarkastettavan näytteen pinta puhdistetaan huolellisesti. Tämän jälkeen tarkastettavalle pinnalle levitetään tunkeumaneste. Tunkeumanesteen pintajännite on hyvin pieni, joten se tunkeutuu helposti pieniinkin pintavirheisiin. Tunkeumanesteen annetaan vaikuttaa tarkastettavalla pinnalla, jotta se ehtii tunkeutua kaikkiin pintavirheisiin. Vaikutusajan jälkeen tunkeumaneste poistetaan näytteen pinnasta ja näytteen pintaan levitetään kehite. Kehitteen vaikutusajana kehite vetää pintavirheisiin tunkeutuneen tunkeumanesteen takaisin pinnalle, jolloin virheet ovat selkeästi nähtävissä. Pintaa tarkastetaan kehitteen vaikutusajan jälkeen visuaalisesti. Tunkeumanesteen toimintaperiaate on esitetty kuvassa 22. [60]



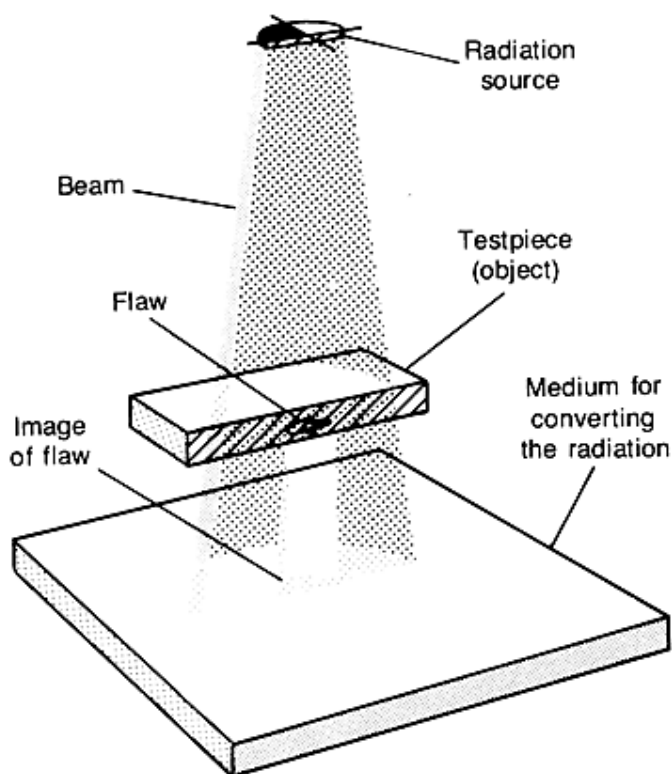
Kuva 22. Tunkeumanestetarkastuksen periaatekuva [61]

Lopuksi näytteen pinta puhdistetaan jäljelle jääneestä tunkeumanesteestä ja kehitteestä. Tarkastuksen yhteydessä näyte hyväksytään tai hylätään havaittujen virheiden ja tarkastuksen tilaajan ohjeistuksen perusteella. [60]

7.4.2 Radiografinen tarkastus

Radiografinen tarkastus kuuluu NDT-tarkastusten volymetrisiin tarkastusmenetelmiin. Volymetrisellä tarkastuksella voidaan havaita pinnanalaiset viat, kuten hitsisauman sisäinen huokoisuus, sulkeumat tai liitosviat.

Radiografinen tarkastus tarkoittaa ionisoivan säteilyn avulla suoritettavaa kuvausta, jossa ionisoivaa säteilyä kohdistetaan kuvattavaan kohteeseen ja kohteen takana olevalle filmille tallentuu kohteen läpäisseen säteilyn voimakkuus. Radiografisen tarkastuksen periaate on esitetty kuvassa 23. [62]



Kuva 23. Radiografisen tarkastuksen periaatekuva [63]

Kuvassa 23 nähdään säteilylähde kuvan yläreunassa. Säteilykeila osoittaa alaspäin kohti näytekappaletta ja kuva muodostuu filmille, joka on näytekappaleen alla. Kuvattava näyte absorboi säteilyä sen kulkiessa näytteen läpi. Materiaalissa olevat mahdolliset virheet absorboivat säteilyä eri määrän kuin niitä ympäröivä perusmateriaali. Näin ollen filmille osuva säteilyn intensiteetti on eri suuruinen näytteessä olevan virheen kohdalla verrattuna virheettömiin kohtiin. [63]

Tavallisimpia kuvausmenetelmiä ovat röntgenkuvaus ja gammakuvaus sekä suurilla seinämänpaksuuksilla hiukkaskiihdytin. Röntgen- ja gammasäteilyä käytetään niiden lyhyen aallonpituuden ja suuren energian takia. Tässä työssä käytetty kuvausmenetelmä oli röntgenkuvaus. Kuva muodostetaan tyypillisesti filmille. Filmille muodostuu piilevä kuva säteilytyksen aikana, joka tulee näkyviin, kun filmi kehitetään. Hitsisaumojen radiografinen kuvaus filmillä suoritetaan standardin SFS-EN ISO 17636-1: Non-destructive testing of welds - Radiographic testing - Part 1: X- and gamma-ray techniques with film mukaan. [62-64]

8. TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

Tämän luvun alaluvuissa tarkastellaan kokeellisen osuuden tuloksia ja tutkimuksissa havaittuja ilmiöitä. Lisäksi arvioidaan, miten nämä havaitut ilmiöt voivat vaikuttaa umpilähdekapselin mekaaniseen kestävyYTEEN.

Näytekapseleiden kemialliset koostumukset määritettiin ja niille tehtiin mikrorakenne-tarkastelu. Mikrorakennetarkastelussa määritettiin näytteiden keskimääräinen raekoko sekä tarkasteltiin kromikarbidien muodostumista hitsausalueille. Näytekapseleiden korroosio-ominaisuuksia tutkittiin polarisaatiomittausten avulla. Lopuksi näytekapseleiden hitsisaumoille suoritettiin NDT-tarkastukset tunkeumanestetarkastuksilla ja radiografi-silla tarkastuksilla. Tutkimusraportti on esitetty liitteessä C.

8.1 Kemiallinen koostumus

Ensisijainen kemiallisen koostumuksen määrittelytapa oli OES-analyysi. AISI 316L -näytteen pienen koon vuoksi sen kemiallinen koostumus jouduttiin kuitenkin määrittelemään käyttäen SEM-EDS-analyysia.

AISI 316L -näytteen SEM-EDS-analyysissä hiili (C) ja happi (O) jätettiin pois tuloksista. Analyysi tehtiin pisteanalyysinä kolmelta alueelta hiotulta pinnalta. On otettava huomioon, että SEM-EDS-analyysillä saatavat tulokset ovat vain arvioita alkuaineiden pitoisuuksista. AISI 316L -näytteen analyysin tulokset on esitetty taulukossa 11.

***Taulukko 11.** AISI 316L -näytteen kemiallinen koostumus EDS-analyysillä määritettynä. Vertailun vuoksi taulukossa on esitetty myös AISI 316L -laadun standardin mukainen koostumus.*

Pitoisuudet	C (m-%)	Si (m-%)	Mn (m-%)	S (m-%)	P (m-%)	Cr (m-%)
Näytekapseli	ei määrit.	0,5	2,5	-	-	17,9
AISI 316L	0,030 (max)	1,00 (max)	2,00 (max)	0,015 (max)	0,045 (max)	16,50– 18,50

	Ni (m-%)	Mo (m-%)	N (m-%)
Näytekapseli	9,5	0,4	-
AISI 316L	10,00– 13,00	2,00– 2,50	0,10

Taulukossa 11 on SEM-EDS-analyysin tulosten lisäksi esitetty vertailun vuoksi myös standardin SFS-EN 10088-1 mukaiset pitoisuudet AISI 316L -teräkselle. Taulukosta nähdään, että näyttemateriaalin molybdeenipitoisuus on melko paljon standardin mukaisesta pitoisuutta pienempi. Analyysi on kuitenkin tehty pisteanalyysinä melko harvoilta alueilta, joten tulos ei välttämättä ole luotettava arvio koko materiaalinäytteen koostumuksesta.

Ruostumattoman teräksen molybdeeniseostus parantaa merkittävästi yleisen ja paikallisen korroosion kestoa, joten AISI 316L -näytekapsoalin alhainen molybdeenipitoisuus voi tarkoittaa heikompia korroosio-ominaisuuksia kuin standardinmukaiselta materiaailta odotetaan. Tämä voi ajan myötä uhata umpilähdekapselin tiiviyyttä. SEM-EDS-analyysillä saatavat tulokset alkuainepitoisuuksista eivät kuitenkaan ole yhtä tarkkoja kuin OES-analyysin tulokset.

AISI 321 -näytteen kemiallinen koostumus analysoitiin OES-analyysillä. Tulokset AISI 321 -näytteen analyysistä on esitetty taulukossa 12.

Taulukko 12. AISI 321 -näytteen kemiallinen koostumus OES-analyysillä määritettynä. Vertailun vuoksi taulukossa on esitetty myös AISI 321 -laadun standardin mukainen koostumus.

Pitoisuudet	C (m-%)	Si (m-%)	Mn (m-%)	S (m-%)	P (m-%)	Cr (m-%)	Ni (m-%)	Mo (m-%)
Näytekapsoali	0,016	0,36	1,86	0,026	0,028	16,7	8,81	0,36
AISI 321	0,08 (max)	1,00 (max)	2,00 (max)	0,015 (max)	0,045 (max)	17,00– 19,00	9,00– 12,00	-

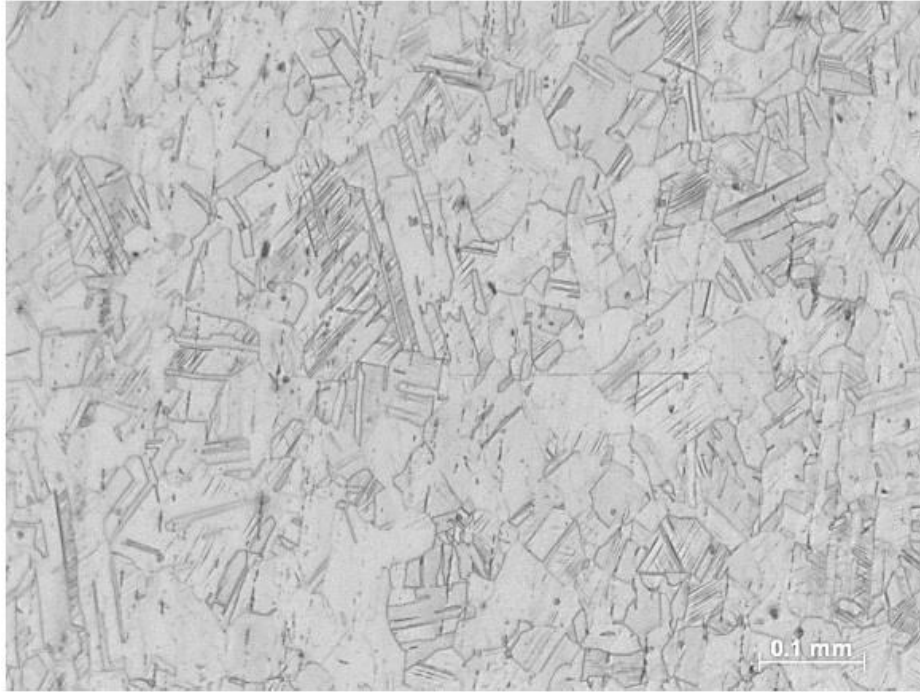
	Cu (m-%)	Al (m-%)	W (m-%)	V (m-%)	Ti (m-%)	Co (m-%)	Nb (m-%)
Näytekapsoali	0,46	0,005	0,03	0,07	0,09	0,15	<0,01
AISI 321	-	-	-	-	5xC— 0,70	-	-

Taulukossa 12 on vertailun vuoksi esitetty myös standardin SFS-EN 10088-1 mukaiset pitoisuudet AISI 321 -teräkselle. Taulukosta nähdään, että näyttemateriaalin hiilipitoisuus on huomattavasti pienempi kuin standardin mukainen hiilipitoisuuden enimmäisarvo. Kromi- ja nikkelipitoisuudet (Cr ja Ni) ovat hieman standardin mukaisia pitoisuuksia pienemmät. Ruostumattoman teräksen alhainen hiilipitoisuus ehkäisee tavallisesti teräksen herkistymistä ja raerajakorroosiota.

8.2 Mikrorakennetarkastelu

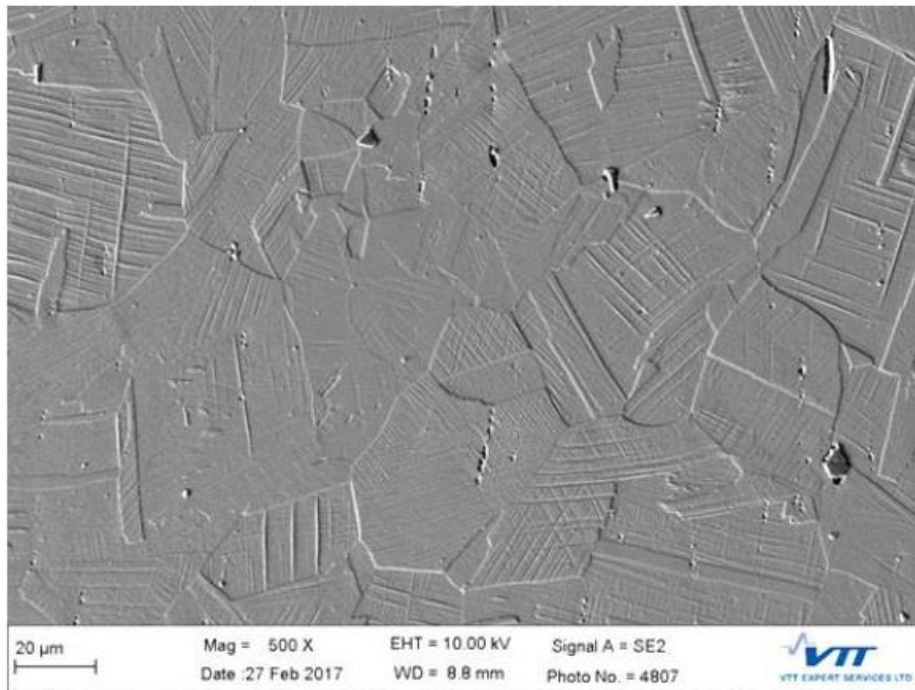
Näytekapseleista valmistettiin poikkileikkausnäytteet materiaalien mikrorakennetarkastelua varten. Näytteet upotettiin muovivalokseen, hiottiin ja syövytettiin. Poikkileikkausnäytteissä oli myös hiilipinnoite.

Optinen kuva ja SEM-kuva AISI 316L -näytteen mikrorakenteesta on esitetty kuvissa 24 ja 25.



Kuva 24. *Optinen kuva AISI 316L -näytteen mikrorakenteesta (Liite C)*

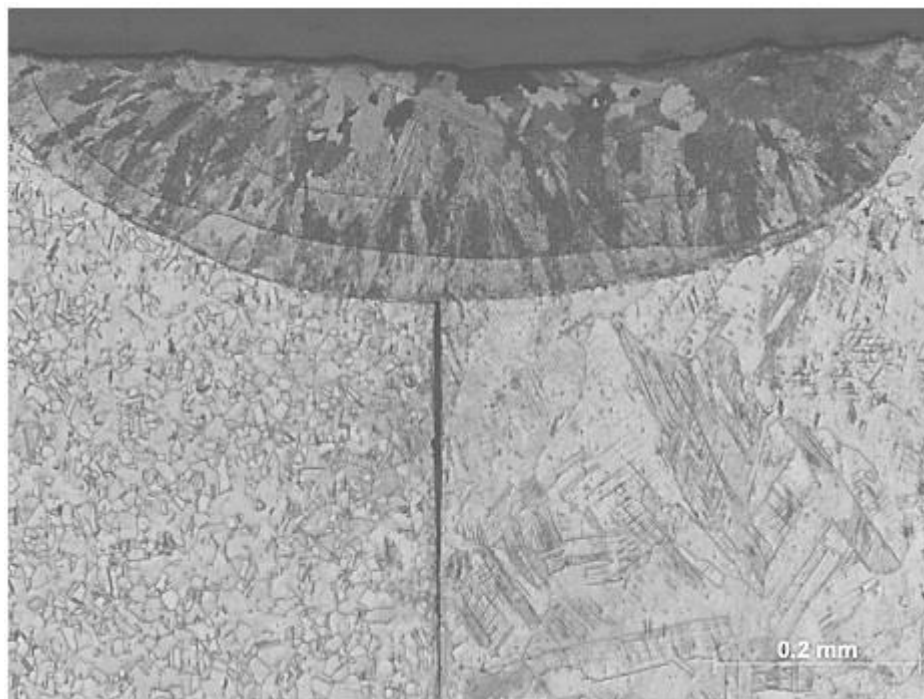
Kuvassa 24 on esitetty optisella mikroskoopilla otettu kuva AISI 316L -näytteen mikrorakenteesta. Kuva on selkeästi vähemmän yksityiskohtainen kuin samasta näytteestä otettu SEM-kuva, kuva 25.



Kuva 25. SEM-kuva AISI 316L-näytteen mikrorakenteesta (Liite C)

Kuvassa 25 on pyyhkäisyelektronimikroskoopilla otettu SEM-kuva AISI 316L -näytteestä. AISI 316L -näytteen mikrorakenne on austeniittinen.

Kuvassa 26 on esitetty optisella mikroskoopilla otettu kuva AISI 321 -näytteestä kannen hitsisaumasta ja sen läheltä. Hitsisauma erottuu selkeästi kuvassa ylhäällä.



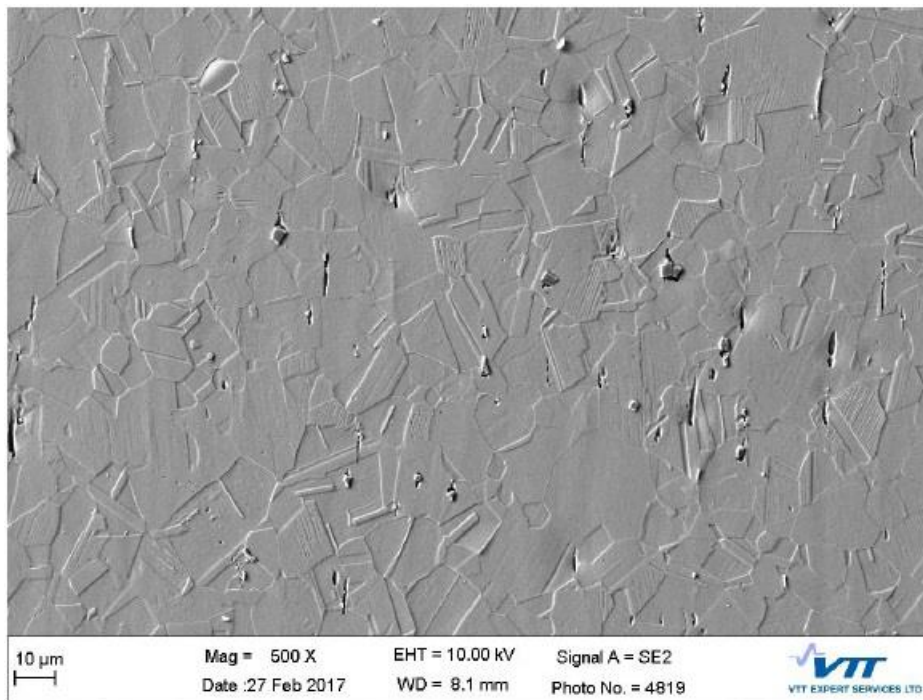
Kuva 26. Optinen kuva AISI 321 -näytteen mikrorakenteesta läheltä hitsisaumaa (Liite C)

Kuvasta 26 nähdään, että hitsattujen osien mikrorakenteet eroavat toisistaan. Kuvassa 26 esiintyvän näytteen tarkempi paikka on osoitettu ympyröinnillä kuvassa 27. Kyseessä oleva hitsisauma on siis kapselin kannen hitsisauma.



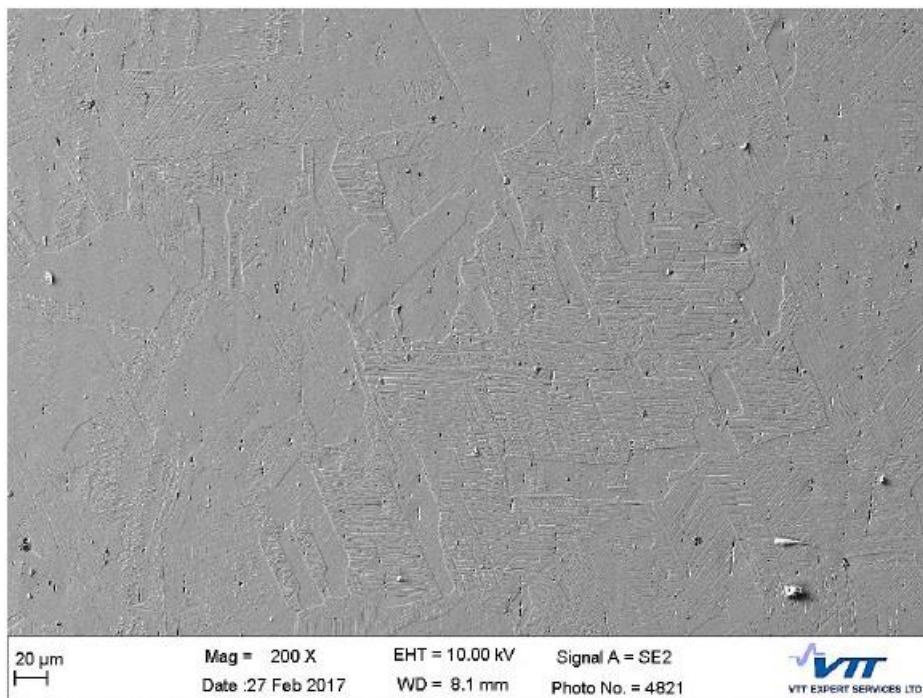
Kuva 27. AISI 321 -kapselin poikkileikkausnäytepalan irrotuspaikka, ympyröity punaisella

Kuvassa 26 esiintyvät kaksi erilaista mikrorakennetta on esitetty SEM-kuvina kuvissa 28 ja 29.



Kuva 28. SEM-kuva AISI 321 -näytteen mikrorakenteesta läheltä hitsisaumaa (Kuvassa 26 vasemmalla puolella) (Liite C)

Kuvassa 28 on esitetty SEM-kuva AISI 321 -näytteen mikrorakenteesta hitsisauman läheltä. Kuvassa on mikrorakenne, joka näkyy kuvassa 26 vasemmalla puolella.



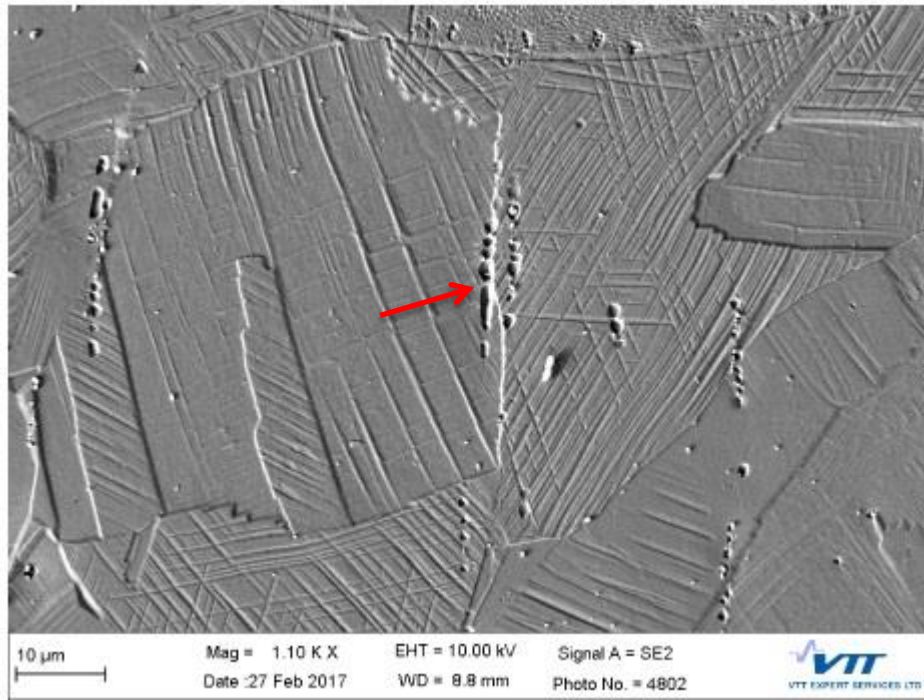
Kuva 29. SEM-kuva AISI 321 -näytteen mikrorakenteesta läheltä hitsisaumaa (Kuvassa 26 oikealla puolella) (Liite C)

Kuvassa 29 on esitetty SEM-kuva AISI 321 -näytteen mikrorakenteesta hitsisauman läheltä. Kuvassa on mikrorakenne, joka näkyy kuvassa 26 oikealla puolella. AISI 321 -näytteen mikrorakenne on molemmilla puolilla austeniittinen, mutta kuvassa 29 esitetyn mikrorakenteen raekoko on suurempi. On huomattava, että kuvassa 28 ja kuvassa 29 on käytetty eri suurennoksia. Syytä AISI 321 -näytteen mikrorakenteen raekokojen eroavaisuuksille ei ole tiedossa. Näytekapselin kansi on kuitenkin hitsattu erillisenä osana kiinni muuhun kapselin kuoreen, joten kannen materiaali voi olla esimerkiksi eri materiaalierästä kuin muualla kapselissa käytetty teräs.

Austeniittisilla ruostumattomilla teräksillä on erinomaiset sitkeysominaisuudet, kohtalainen lujuus, hyvät korroosio-ominaisuudet ja ne ovat helposti hitsattavia. Näiden ominaisuuksien vuoksi ne sopivat hyvin umpilähdekapseleiden materiaaleiksi.

8.2.1 Kromikarbidien esiintyminen

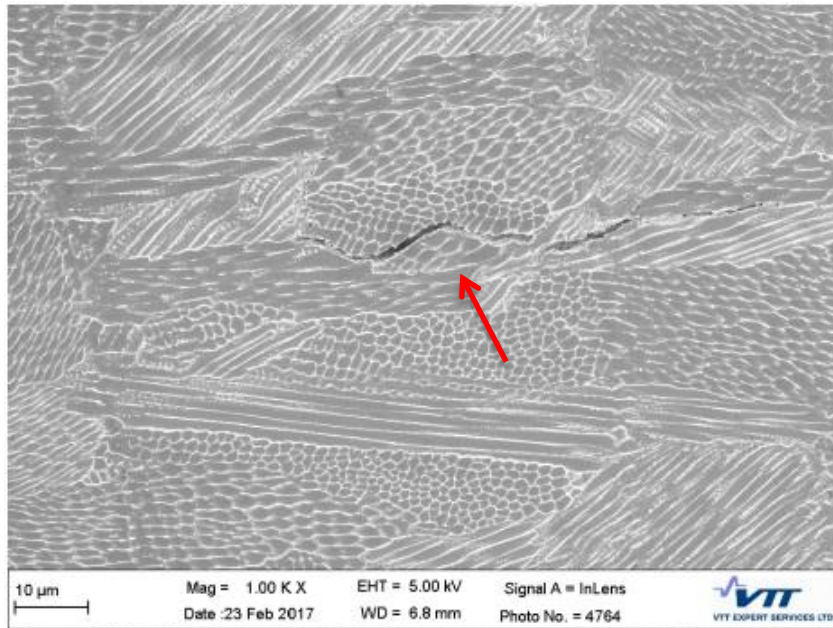
Näytteiden hitsausalueita ja muutosvyöhykkeitä tarkasteltiin poikkileikkausnäytteistä pyyhkäisyelektronimikroskoopin avulla. SEM-kuvista tarkasteltiin mahdollista kromikarbidien muodostumista kyseisillä alueilla. Kuvassa 30 on SEM-kuva AISI 316L -näytteestä.



Kuva 30. Kromikarbideja AISI 316L -näytteen perusaineessa lähellä hitsausaluetta. Yksi karbidialue osoitettu kuvassa punaisella nuolella (Liite C)

Kuvasta nähdään, että AISI 316L -näytteestä löydettiin kromikarbideja materiaalin perusaineesta läheltä hitsausaluetta. Austeniittisessa ruostumattomassa teräksessä voi muodostua kromikarbideja herkistymisen seurauksena 550–800 °C:een lämpötila-alueella. Niitä voi muodostua hitsisauman alueella ja muutosvyöhykkeellä hitsauksen lämmöntononin takia. Kromikarbidien muodostuminen tarkoittaa yleensä karbidien vieressä olevan alueen köyhtymistä kromista. Kromiköyhälle alueelle ei muodostu passiivikalvoa, joten se altistuu raerajakorroosiolle muita alueita helpommin. Tämä voi ajan myötä uhata umpilähdekapselin tiiviyyttä.

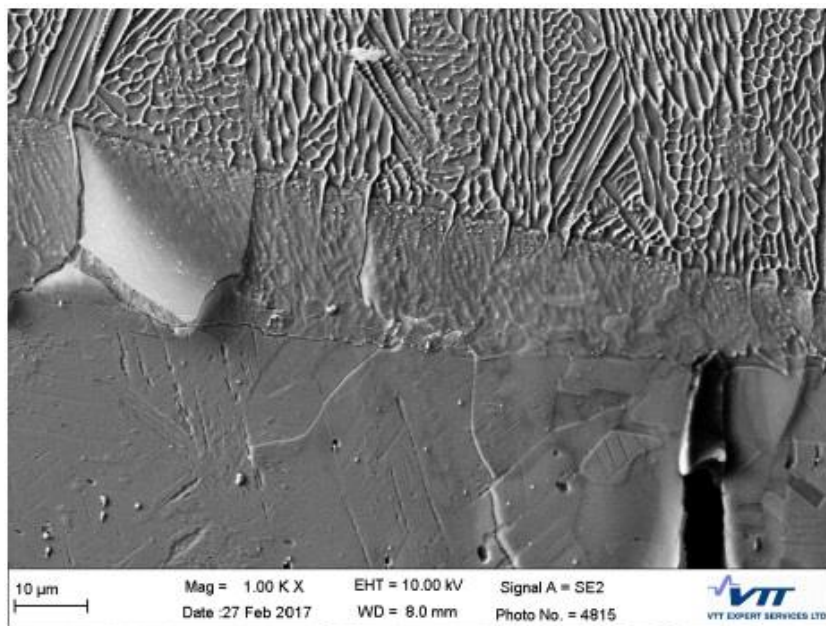
Lisäksi AISI 316L -näytteen hitsisaumasta löydettiin särö. Tämä on esitetty kuvassa 31.



Kuva 31. Särö AISI 316L -näytteen hitsisaumassa, osoitettu punaisella nuolella (Liite C)

Kuvassa 31 osoitettu särö näyttää tutkimusraportin perusteella olevan hitsisauman keskilinjalla. Tällöin särön syntymisen syynä voi olla kuumahalkeama, joka voi syntyä hitsisulan jäähdyttymisen yhteydessä. Kun materiaali jäähtyy epätasaisesti ja hitsin keskilinjalle suotautunut epäpuhdas seos on vielä sula, syntyy jännityksiä, jotka voivat aiheuttaa repeämiä. Täysin austeniittinen rakenne on herkempi kuumahalkeamille, kuin rakenne jossa on myös hieman ferriittiä. [28]

AISI 321 -näytteen kromikarbiditarkastelu on esitetty kuvassa 32.



Kuva 32. AISI 321 -näytteen SEM-kuva hitsausalueen läheltä (Liite C)

Näytteen SEM-kuvista hitsausalueen läheltä ei havaittu kromikarbidimuodostumia. Kuvassa 32 näkyvä hilseily johtuu näytteen pinnassa olleen hiilipinnoitteen irtoamisesta.

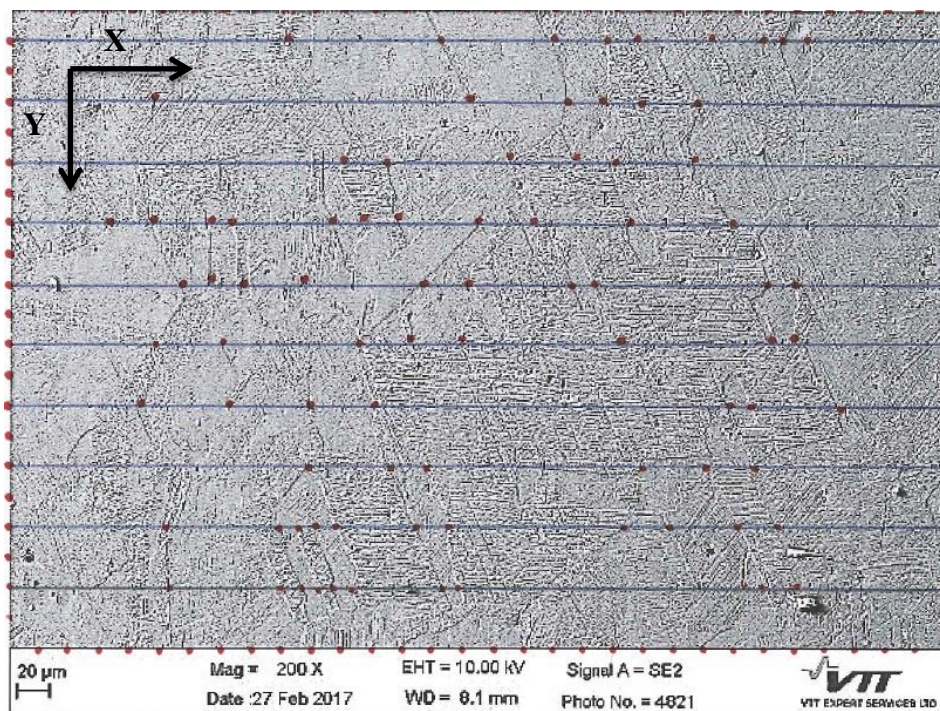
8.2.2 Raekoko

Tutkimusraportissa määriteltiin keskimääräiset raekoot ainoastaan AISI 316L -näytteelle sekä AISI 321 -näytteen kuvassa 28 esiintyvälle mikrorakenteelle. AISI 321 -näytteessä esiintyi kuitenkin selvästi kaksi toisistaan raekooltaan eroavaa mikrorakennetta, joten kuvassa 29 esiintyvän mikrorakenteen raekoko on määritelty kuvasta itse. Näytteiden keskimääräiset raekoot x- ja y-suunnissa on koottu taulukkoon 13.

Taulukko 13. Keskimääräiset raekoot x- ja y-suunnissa.

Näyte	Keskimääräinen raekoko x-suunnassa (μm)	Keskimääräinen raekoko y-suunnassa (μm)
AISI 316L	50	58
AISI 321 (Kuva 28, VTT:n määrittämä)	12	13
AISI 321 (Kuva 29, erikseen määritetty)	~78	~94

Taulukosta 13 nähdään, että AISI 316L -näytteessä keskimääräinen raekoko on suurempi AISI 321 -näytteen pienempään raekokoon verrattuna. AISI 321 -näytteen kuvassa 29 esiintyvä raekoko on kuitenkin huomattavasti suurempi. Kuvasta 29 raekoko on määritetty erikseen kuvan 33 esimerkin mukaisesti standardia ASTM E112-12 Standard Test Methods for Determining Average Grain Size soveltaen [65].



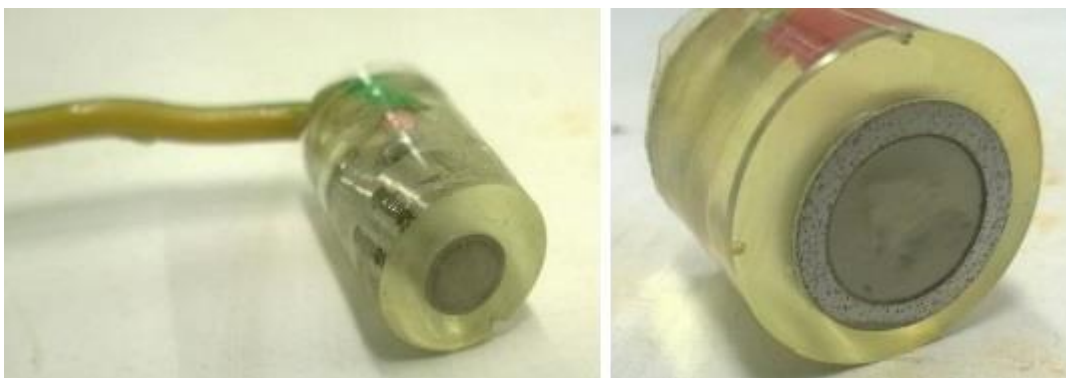
Kuva 33. Esimerkki raekoon määrittämisestä *x*-suunnassa AISI 321 -näytteen kuvassa 29 esiintyvistä mikrorakenteista

Kuvassa 29 rakeet eivät erottuneet yhtä selkeästi kuin kuvassa 28, joten raekoon määrittäminen oli hyvin vaikeaa. Näin ollen kuvasta 29 määritetyn raekoon virhemarginaali on suurempi. Taulukossa 13 esitetyistä arvoista nähdään kuitenkin, että eri näytteiden raekokojen kokoluokat eroavat selkeästi toisistaan. AISI 321 -näytteiden raekokojen eroavaisuudet voivat johtua esimerkiksi kansimateriaalin eri materiaalierästä muuhun kapselimateriaaliin verrattuna.

8.3 Polarisaatiomittaukset

Tutkittaville AISI 316L- ja 321 -näytteille suoritettiin polarisaatiomittaukset liuoksessa, joka sisälsi 3,5 m-% natriumkloridia (NaCl) puhtaassa hanavedessä. Mittaukset suoritettiin +40 °C:een lämpötilassa. Mittakennossa teräsnäytteet toimivat näyte-elektrodeina, vastaelektrodina käytettiin hiilitankoa ja referenssielektrodina Ag/AgCl-elektrodi.

Näytteet valmistettiin polarisaatiomittausta varten kiinnittämällä molempiin näytteisiin pinnoitetut kuparilangat ja valamalla näytteet epoksimuottiin. Mittausalueina käytettiin AISI 316L -näytteen koko pohjapintaa ja AISI 321 -näytteen pohjan sisä- ja ulkoympyrän väliin jäävää kehää. AISI 321 -näytteen pohjan keskiosa pinnoitettiin epoksilla. Ennen mittauksia näytteiden pinnat hiottiin. Näytteet on esitetty kuvassa 34.



Kuva 34. Polarisaatiomittausnäytteet hitaan syklisen polarisaatiomittauksen jälkeen. AISI 316L -näyte vasemmalla, AISI 321 -näyte oikealla. (Liite C)

Näytteiden yleisen korroosion korroosionopeudet mitattiin Tafelin menetelmällä. Ennen mittausta näytteiden annettiin asettua tasapainoon liuoksessa 30 minuutin ajan. Polarisaatio aloitettiin 150 mV korroosiopotentiaalia negatiivisemmalla potentiaalilla ja polarisoitiin 300 mV anodiseen suuntaan 10 mV/min nopeudella. Korroosionopeudet laskettiin näin saaduista kulmakertoimista. Testi toistettiin kolme kertaa ja saadut korroosionopeudet on esitetty taulukossa 14. Taulukosta nähdään, että AISI 321 -näytteen keskimääräinen korroosionopeus oli hieman suurempi AISI 316L -näytteeseen verrattuna.

Taulukko 14. AISI 316L- ja 321 -näytteiden korroosionopeudet 3,5 m-% NaCl-liuoksessa

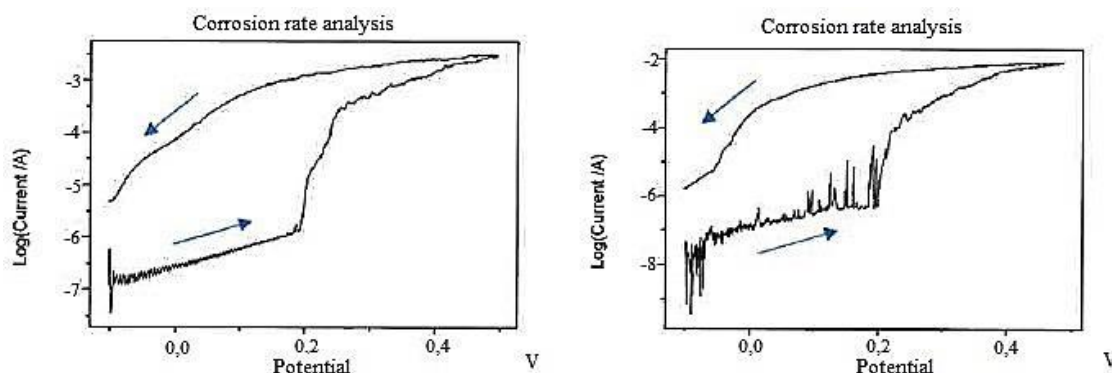
	Korroosionopeus ($\mu\text{m/a}$)			
Testi	1	2	3	Keskiarvo
AISI 316L	1,6	0,79	0,67	1,0
AISI 321	2,4	2,8	2,7	2,6

Käytetty testiliuos vastaa suolaisuudeltaan merivettä. Normaaaleissa käyttöolosuhteissa umpilähdekapselit eivät altistu vastaaville liuoksille, mutta höyrystymisen seurauksena on mahdollista, että erilaisia korrodoivia liuoksia pääsee kontaktiin umpilähdekapselin kanssa. 40 °C:een lämpötila voi olla tavallinen umpilähdekapselin käyttölämpötila tietyissä teollisuuden sovelluksissa.

Yleisen korroosion keskimääräinen korroosionopeus AISI 316L -näytteessä oli 1,0 $\mu\text{m/a}$ ja AISI 321 -näytteessä 2,6 $\mu\text{m/a}$. Umpilähdekapselin seinämänpaksuus on noin 1 mm, joten umpilähteen normaalin käyttöiän aikana yleisen korroosion korroosionopeus ei ole merkittävä kapselin tiiviyyden kannalta. Esimerkiksi beetasäteilylähteissä, kuten AISI 321 -kapselissa, voi kuitenkin olla myös hyvin ohut, noin 0,1 mm paksuinen teräsikkuna. Tämä ikkuna voi aiheuttaa hieman suuremman riskin hyvin korrodoivissa olosuhteissa myös umpilähdekapselin normaalin käyttöiän aikana. Normaaaleissa käyt-

töolosuhteissa umpilähdekapselit eivät kuitenkaan altistu pitkiä aikoja polarisaatiomittauksen kaltaisille olosuhteille.

Näytteiden taipumusta paikalliseen korroosioon (piste- ja rakokorroosio) tutkittiin syklisellä polarisaatiomittauksella. Näytteiden annettiin jälleen asettua liuoksessa tasapainoon 30 minuutin ajan. Mittaukset aloitettiin 100 mV korroosipotentialia negatiivisemmalla potentialilla ja polarisoitiin 10 mV/min nopeudella +500 mV:n potentialiin, jossa polarisoinnin suunta käännettiin. Syklisen polarisaatiomittauksen tulokset on esitetty kuvassa 35.



Kuva 35. Syklisen polarisaatiomittauksen tulokset 10 mV/min nopeudella. AISI 316L -näyte vasemmalla, AISI 321 -näyte oikealla. (Liite C)

Suuri alue anodisen ja katodisen polarisaation välissä osoittaa, että molemmat näytteet kärsivät merkittävästä paikallisesta korroosiosta testiliuoksessa. Molempien näytteiden pinnoilla havaittiin piste- ja rakokorroosiota. Rakokorroosio alkoi metallin ja epoksin rajalta. Selkeää eroa paikallisen korroosion vastustuskyvyssä ei näytteiden välillä havaittu. PRE-arvot molemmille näyttemateriaaleille luvussa 5.3.2 esitellyn kaavan (1) mukaisesti on laskettu taulukossa 15.

Taulukko 15. Näyttemateriaalien lasketut PRE-arvot

Näyttemateriaali	Cr (m-%)	Mo (m-%)	N (m-%)	PRE
AISI 316L	17,90	0,40	-	19,22
AISI 321	16,70	0,36	-	17,89

Taulukosta 15 nähdään, että näyttemateriaaleille määritetyn kemiallisen koostumuksen perusteella lasketut PRE-arvot eivät eroa merkittävästi toisistaan. AISI 316L -näytteen PRE-arvoa laskee sen matala molybdeenipitoisuus.

Korroosionopeus paikallisessa korroosiossa voi olla huomattavasti suurempi yleisen korroosion korroosionopeuteen verrattuna. Paikallisen korroosion alkamista voi myös olla vaikea huomata, ja siksi se onkin yleistä korroosiota vaarallisempaa. Koska mo-

lemmat näytemateriaalit osoittivat taipumusta paikalliseen korroosioon, tulisi paikallista korroosiota edistävien olosuhteiden syntymistä pyrkiä umpilähdekapselin käytön aikana estämään. Paikallinen korroosio alkaa yleensä paikoista, joissa ruostumattoman teräksen passiivikalvo on vahingoittunut tai muuten epäjatkua. Tällaisia paikkoja voivat olla esimerkiksi pinnan virheet, kuten naarmut ja lika, tai materiaalin epäjatkuvuuskohdat, kuten hitsisaumat. Ruostumaton teräs on altis paikalliselle korroosiolle etenkin altistuksessaan kloridipitoisille liuoksille, joita umpilähdekapselin pinnalle voi päästä prosessista höyrystymisen seurauksena. Tämän estäminen on kuitenkin käytännössä hyvin vaikeaa, joten umpilähdekapselin pinnan puhtaudesta ja virheettömyydestä huolehtimisen tärkeys korostuu.

8.4 Hitsisaumojen NDT-tarkastus

Tunkeumanestetarkastuksella tarkastettiin AISI 316L -näytteen pohjan hitsisauma (liite A, kuva 38) ja AISI 321 -näytteen kannen ja pohjan hitsisaumat (liite B, kuvat 41 ja 42). Kummassakaan näytteessä ei tunkeumanestetarkastuksella havaittu poikkeamia.

Radiografiset tarkastukset tehtiin AISI 316L- ja AISI 321 -näytteiden hitsisaumoille. AISI 321 -näyte kuvattiin sekä ikkuna ylöspäin että alaspäin. Näytteet asetettiin muovisen astian pohjalle ja astia täytettiin hienolla teräspulverilla kuvatus osion yläreunan korkeudelle. Astian pohjan paksuus oli noin 1,5 mm ja filmi asetettiin suoraan astian pohjan alle. Testiparametrit on esitetty taulukossa 16.

Taulukko 16. AISI 316L- ja 321 -näytteiden radiografisen kuvauksen testiparametrit

Näyte	Seinäämä (mm)	KV/mA	Valotus (min)	SFD (mm)	Ind. lanka
AISI 316L	6	130/6	1.0	750	W16
AISI 321 (A)	6	130/6	1.0	750	W16
AISI 321 (B)	9	160/5.5	0.9	750	-

Näyte	Kuv. tekn.	Ind. sij.	Vika	Huomautus
AISI 316L	7	1	-	Ei havaittuja poikkeamia
AISI 321 (A)	7	1	-	Ei havaittuja poikkeamia
AISI 321 (B)	7	1	-	Ei havaittuja poikkeamia

Taulukossa 16 *KV/mA* tarkoittaa röntgenputken jännitettä ja virtaa, *SFD* säteilylähteen ja filmin välistä etäisyyttä (source-to-film distance), *Ind. lanka* indikaattorilankaa, *Kuv. tekn. 7* kuvaustekniikkana kohtisuoraa kuvausta ja *Ind. sij. 1* indikaattorin sijoitusta säteilylähteen puolella. Yhdessäkään radiografisessa kuvauksessa ei havaittu poikkeamia.

Hitsisaumat ja niitä ympäröivät muutosvyöhykkeet ovat aina perusaineen mikrorakenteesta poikkeavia alueita ja näin ollen mahdollisia paikkoja perusaineesta poikkeaville mekaanisille ominaisuuksille ja korroosio-ominaisuuksille. Käytännössä umpilähdekapselien hitsisaumojen tarkempi tarkastus silmämääräisen tarkastuksen lisäksi on vaikeaa umpilähteen käyttäjän toimesta, koska kapseli sisältää säteilevää radioaktiivista ainetta. Paras tilanne olisi, jos umpilähdevalmistaja suorittaisi umpilähdekapselin hitsisauhalle NDT-tarkastuksen kapselin valmistuksen yhteydessä ja toimittaisi siitä todistuksen umpilähdekapselin toimituksen yhteydessä.

9. SUOSITUKSET JA JATKOTOIMET

Tässä luvussa annetaan luvussa 8 esiteltyjen havaintojen perusteella suosituksia siitä, miten suositellun käyttöiän ylittäneiden umpilähdekapselien valvontaa voisi kehittää ja miten riskikohteet säteilylähdekisterissä tunnistetaan. Lopuksi esitellään jatkotoimia aiheen tutkimisen jatkamiseksi.

9.1 Suositellun käyttöiän ylitys

Luvussa 4 esitellyissä eri maiden umpilähteiden ikääntymiseen liittyvissä säädöksissä ja vaatimuksissa huomattiin olevan melko paljon eroavaisuuksia maiden välillä. Jokaisessa esitellyssä maassa umpilähteille vaaditaan tehtäväksi pyyhintäkokeita ja niiden suorustiheys vaihtelee jonkin verran tapauskohtaisesti. Pääsääntöisesti normaalissa käytössä, normaaleissa käyttöolosuhteissa säteilysuojuksessa olevalle umpilähteelle ohjeistettu pyyhintäkokeiden suoritusväli on 1–2 vuotta. Tiheämpää testiväliä suositellaan esimerkiksi, jos umpilähde on ylittänyt sille asetetun suositellun käyttöiän tai umpilähde on voinut altistua mahdollisesti kapselia heikentäville tekijöille kuten korrodoiville käyttöolosuhteille tai kapselia mahdollisesti vahingoittavalle käsittelylle.

Umpilähdevalmistajan asettaman suositellun käyttöiän ylitystä koskevia ohjeistuksia on luvussa 4 esitellyillä mailla melko vähän. Ainoastaan australialaisella viranomaisella oli hyvin selkeät ja kattavat ohjeet umpilähteiden käytön jatkamiseksi suositellun käyttöiän ylityttyä. Iso-Britannian viranomainen suosittelee tiheämpää pyyhintäkokeiden testiväliä, mikäli umpilähteen käyttöä jatketaan suositellun käyttöiän täyttymisen jälkeen, mutta ei ohjeista asiassa tarkemmin. Suositeltu käyttöikä on aika, jonka ajan valmistaja odottaa umpilähteen säilyttävän suorituskykynsä suunnitellussa käyttökohteessa ja sovelluksessa. Umpilähdekapselin siis odotetaan suoriutuvan ISO-luokituksensa mukaisista mekaanisista rasituskokeista pysyen tiiviinä myös suositellun käyttöikänsä lopussa, mikäli umpilähdettä on käytetty sen suunnitellussa sovelluksessa ja käyttöolosuhteissa. Tämän oletuksen nojalla umpilähteen käyttöä voitaisiin jatkaa myös suositellun käyttöiän täytyttyä, mikäli kapseli todetaan tiiviyskokeella ja silmämääräisen tarkastuksen perusteella tiiviiksi ja käyttökelpoiseksi.

Mikäli umpilähteen käyttöä halutaan jatkaa suositellun käyttöiän ylityttyä, suositellaan luvanhaltijan selvittävän Säteilyturvakeskukselle seuraavia asioita:

- Ovatko umpilähteen sovellus ja käyttöolosuhteet samat, kuin mihin umpilähdekapseli on suunniteltu?

- Onko umpilähteen käyttöympäristö mahdollisesti korrodoiva? Voiko säteilysuojuksen sisälle kulkeutua happamia tai kloridipitoisia liuoksia, esimerkiksi höyrystymisen seurauksena?
- Kuinka paljon umpilähdekapselia käsitellään? Käytetäänkö käsittelyssä työkaluja, jotka voivat vahingoittaa umpilähdekapselin pintaa?
- Altistuuko umpilähdekapseli lialle, esimerkiksi käsittelyn yhteydessä? Puhdistetaan乎 umpilähdekapselin pinta käsittelyn yhteydessä?

Yllä lueteltujen asioiden avulla voidaan hahmottaa, millaisessa ympäristössä umpilähdekapselia käytetään. Suurimpia riskejä umpilähdekapselin tiiviydelle ovat korroosion eri muodot. Korroosion alkamisen kannalta oleellisia tekijöitä ovat käyttöympäristön korroosiotekijät ja umpilähdekapselin pintavauriot.

Ennen umpilähteen käytön jatkamista suositellun käyttöiän ylittyä, suositellaan suoritettavaksi umpilähdekapselin kunnon tarkastus. Tämä tarkastus on luvanhaltijan vastuulla. Tarkastuksessa olisi hyvä huomioida ainakin seuraavat asiat:

- Umpilähdekapselin pinnan tarkastus, erityisesti hitsisaumojen läheisyydessä, soveltuvalla menetelmällä (esimerkiksi visuaalinen tarkastus, tunkeumanestetarkastus, magneettijauhetarkastus)
- Tiiviyskoe soveltuvalla menetelmällä

Suosittelun käyttöiän ylittäneille umpilähteille suositellaan tiheämpää pyyhintäkokeiden testiväliä. Vuosittaisen pyyhintäkokeen teko kaikille suositellun käyttöiän ylittäneille umpilähteille on melko ankara vaatimus, joten umpilähteitä voisi jakaa eri luokkiin niiden mahdollisen kontaminaatoriskin perusteella. Kontaminaatoriskiinkin vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi:

- Umpilähteen aktiivisuus
- Radioaktiivisen aineen kemiallinen ja fysikaalinen muoto
- Ikkunallinen vai ikkunaton kapseli
- Yksin- vai kaksinkertainen kapselointi
- Korrodoiva vai korrodoimaton käyttöympäristö

Umpilähteen pienempi aktiivisuus luo matalamman kontaminaatoriskin. Radioaktiivinen aine metallisessa, lasisessa tai keraamisessa muodossa luo matalamman kontaminaatoriskin esimerkiksi helposti liukenevassa kloridimuodossa olevaan radioaktiiviseen aineeseen nähden. Umpilähdekapselin ikkuna tai yksinkertainen kapselointi heikentää kapselin mekaanista kestävyyttä ja nostaa näin kontaminaatoriskiä. Mikäli umpilähdekapselin käyttöympäristössä ei ole kemikaaleja tai merkittävää kosteutta, on korroosioriski ja sitä myötä kontaminaatoriski matalampi. Ohjeellinen ehdotus suositellun käyttöiän ylittäneiden umpilähteiden pyyhintäkokeiden testiväleille on esitetty taulukossa 17.

Taulukko 17. Ohjeellinen ehdotus suositellun käyttöiän ylittäneiden umpilähteiden pyyhintäkokeiden testiväleiksi

Kontaminaatoriskiin vaikuttava tekijä		Ehdotus pyyhintäkokeen testiväleiksi (a)
Umpilähteen aktiivisuus	HASS-lähteet	1
Radioaktiivisen aineen kemiallinen ja fysikaalinen muoto	Kloridimuoto tai muoto ei tiedossa	1
	Metalli-, keraami- tai lasipelletti	2 tai muu
Ikkunallinen vai ikkunaton kapseli	Ikkunallinen kapseli	1
	Ikkunaton kapseli	2 tai muu
Yksin- vai kaksinkertainen kapselointi	Yksinkertainen kapselointi	1
	Kaksinkertainen kapselointi	2 tai muu
Korrodoiva vai korrodoimaton käyttöympäristö	Korrodoiva käyttöympäristö (kemikaalit, kosteus)	1
	Korrodoimaton käyttöympäristö (ei merkittävästi kemikaaleja, kuiva)	2 tai muu

Taulukossa 17 on haluttu korostaa tiettyjä kontaminaatoriskiin vaikuttavia tekijöitä, joiden olisi hyvä vaikuttaa pyyhintäkokeiden testivälin pituuteen. Yksittäiseen umpilähteeseen pätee luonnollisesti useampi rivi yllä olevasta taulukosta ja tällöin täytyy käyttää harkintaa pyyhintäkokeen testivälin asettamisessa. Kuitenkin, jos jokin taulukossa esitetty selkeästi kontaminaatoriskiin vaikuttava tekijä pätee, ehdotetaan pyyhintäkokeen testiväleiksi suositellun käyttöiän ylittäneillä umpilähteillä yhtä vuotta.

9.2 Umpilähdevalmistajien tarjoama lisätieto

Umpilähteiden valvontaa helpottaisi umpilähdevalmistajan tarjoama lisätieto umpilähdekapselien materiaaleista sekä hitsisaumojen laadusta. Näin umpilähteiden käyttäytymistä korroosio-olosuhteissa tai poikkeavissa tilanteissa olisi helpompi arvioida.

Tällä hetkellä umpilähdevalmistajat tarjoavat melko yleistä tietoa umpilähdekapselissa käytettävistä materiaaleista. Umpilähteen sertifikaatissa kapselimateriaalista annettu tieto on usein ”ruostumaton teräs”. Mikäli käytetty teräslaatu olisi nähtävillä umpilähdesertifikaatissa, olisi umpilähteen mekaanisia ominaisuuksia ja korroosio-ominaisuuksia helpompi arvioida.

Umpilähdevalmistajat eivät myöskään tarjoa sertifikaateissaan tietoa umpilähdekapselien hitsisaumojen tarkastuksesta. Umpilähdevalmistajan tarjoama todistus umpilähdekapselin hitsisauman NDT-tarkastuksesta tai jokin muu varmistus hitsisauman virheettömyydestä lisäisi varmuutta kapselin kestävydestä.

9.3 Riskikohteet säteilylähderekisterissä

Suoranaisia riskikohteita umpilähdekapselin vuotamisen kannalta säteilylähderekisteristä on vaikea löytää, mutta joitakin riskiä kasvattavia kriteereitä voidaan esitellä. Näiden perusteella voidaan tarkemmin arvioida, onko säteilylähderekisterissä mahdollisia riskikohteita. Umpilähdekapselin vuotoriskiä kasvattavat tekijät on koottu taulukkoon 18.

Taulukko 18. Umpilähdekapselin vuotoriskiä kasvattavat tekijät

Riskitekijä	Huomioitavaa
Radioaktiivisen aineen muoto	<ul style="list-style-type: none"> - Kontaminaation leviäminen <ul style="list-style-type: none"> o Metall-, lasi- ja keraamipelletit turvallisempia o Kloridipelletti helposti liukeneva
Korrodoiva käyttöympäristö	<ul style="list-style-type: none"> - Kosteus - Kemikaalit <ul style="list-style-type: none"> o Erityisesti kloridiliuokset
Umpilähdekapselin ikkuna	<ul style="list-style-type: none"> - Heikkomat mekaaniset ominaisuudet - Ohuen teräsikkunan korroosio

Kuten taulukossa 18 esitetään, umpilähdekapselin sisällä olevan radioaktiivisen aineen kemiallisella muodolla on suuri merkitys radioaktiivisen kontaminaation syntyyn ja leviämiseen, mikäli umpilähdekapselin vuototapaus ilmenee. Metallisessa, lasisessa tai keraamisessa muodossa oleva radioaktiivinen aine ei ole helposti liukeneva, joten se ei leviä helposti ympäristöön mahdollisessa vuototapauksessa. Helposti liukeneva kloridimuotoinen radioaktiivinen aine taas leviää erittäin helposti päästessään kosketuksiin kosteuden kanssa ja kontaminaatio on vaikeasti puhdistettavissa. Etenkin vanhoissa ^{137}Cs -umpilähteissä radioaktiivinen aine on usein ollut $^{137}\text{CsCl}$:a. Tästä syystä ^{137}Cs -umpilähteitä, joiden sertifikaateissa ei ole tietoa radioaktiivisen aineen kemiallisesta tai fysikaalisesta muodosta, voidaan pitää korkeamman riskin kohteina.

Toinen oleellisesti umpilähdekapselin vuotoriskiä kasvattava tekijä on korrodoiva käyttöympäristö. Austeniittiset ruostumattomat teräkset vastustavat pääsääntöisesti hyvin yleistä korroosiota, mutta ovat alttiita paikalliselle korroosiolle etenkin happamia tai kloridipitoisia liuoksia sisältävissä olosuhteissa. Näin ollen umpilähdekapselin vuotoriskiin vaikuttaa oleellisesti se, millaisissa olosuhteissa umpilähdekapselia käytetään. Pääsääntöisesti kuivissa ja vähän kemikaaleja sisältävissä ympäristöissä umpilähdekapselin vuotoriski on alhainen.

selin paikallinen korroosioriski on matala. Prosessin suuri kosteus ja runsas kemikaalien käyttö taas voivat johtaa kemikaalien höyrystymiseen. Tällöin korrodoivia liuoksia voi päästä umpilähdekapselin pinnalle, mikä lisää kapselin korroosioalttiutta ja sitä myötä vuotoriskiä.

Kolmas umpilähdekapselin vuotoriskiä kasvattava tekijä on joissakin umpilähdekapsleissa oleva ikkuna. Alfa- ja beetasäteilylähteissä on tavallisesti ohut ikkuna alfa- ja beetasäteilyn heikon läpäisykyvyn takia. Gammasäteilylähteissä ikkunaa ei ole. Ikkuna voi olla eri materiaalia kuin muu umpilähdekapseli tai se voi olla tehty hyvin ohuesta ruostumattomasta teräksestä, kuten tämän työn tutkimusosuudessa käytetyssä AISI 321-umpilähdekapselissa. Tällaisen ikkunan mekaaniset ominaisuudet ovat merkittävästi heikommalla muuhun umpilähdekapseliin nähden ja kasvattavat näin umpilähteen vuodon riskiä. Ohut teräsikkuna luonnollisesti puhkeaa myös korroosion vaikutuksesta nopeammin kuin muut paksummat kapselin seinämät. Ikkunallisia umpilähteitä voidaan näin ollen myös pitää korkeamman riskin kohteina.

9.4 Jatkotutkimukset

Tämän työn aihepiirin tutkintaa on hyvä jatkaa Säteilyturvakeskuksen hallussa olevan vaurioituneen umpilähdekapselin tutkinnalla. Kyseinen umpilähdekapseli on useita vuosikymmeniä teollisuussovelluksessa käytössä ollut gammasäteilylähte.

Jatkotutkimuksissa tulee pyrkiä selvittämään umpilähdekapselin vauriomekanismi. Tieto siitä, onko kapseli vaurioitunut esimerkiksi käytössä ollessaan korroosion takia tai kapselin käsittelyn yhteydessä mekaanisen rasituksen takia, auttaa arvioimaan tämän työn luvussa 5 esiteltyjen tekijöiden painoarvoja ja todennäköisyyksiä. Toki kyseessä on yksittäinen vaurioitunut umpilähdekapseli, mutta laajan tutkimusaineiston puutteessa yksittäinenkin kapseli voi tarjota arvokasta lisätietoa. Mikäli vaurion voidaan todeta syntyneen käytön aikana vallinneiden olosuhteiden seurauksena, voidaan samankaltaisissa käyttöolosuhteissa käytettävien umpilähteiden valvontaa kehittää. Mikäli vaurion todennäköisin syy on umpilähdekapselin käsittely, voidaan käsittelyn ohjeistuksia parantaa ja täsmentää.

10. YHTEENVETO

Tämän diplomityön tarkoituksena oli selvittää umpilähdekapselien ikääntymistä ja siihen liittyviä tekijöitä teollisuuden sovelluksissa. Umpilähde on säteilylähde, jossa radioaktiivinen aine on suljettu tiiviisti metallikapselin sisälle niin, ettei se pääse leviämään kapselin ulkopuolelle eikä sitä voi koskettaa. Umpilähteitä käytetään monenlaisissa sovelluksissa niin terveydenhuollossa, tutkimuksessa kuin teollisuudessa, mutta tässä työssä keskityttiin teollisuuden käyttöympäristöihin ja erityisesti gammasäteilylähteisiin. Työn tavoitteena oli antaa suosituksia suositellun käyttöiän ylittäneiden umpilähteiden valvontaan ja mahdollisten riskikohteiden tunnistamiseen säteilylähderekistressä.

Umpilähteiden radioaktiivisen aineen kemiallinen ja fysikaalinen olomuoto sekä kapselimateriaalit valitaan umpilähteen käyttösovelluksen ja käyttöolosuhteiden mukaan. Umpilähde on yksin- tai kaksinkertaisesti kapseloitu ja kapseli voi sisältää ohuen ikkunan. Luvussa 2 esiteltiin umpilähteiden rakennetta ja niissä käytettäviä materiaaleja sekä tavallisimpia umpilähteiden teollisia sovelluksia. ^{137}Cs ja ^{60}Co ovat lukumäärältään käytetyimmät nuklidit teollisuussovelluksissa Suomessa. ^{60}Co on umpilähdekapselissa metallisessa muodossa ja ^{137}Cs nykyään pääasiassa keraamisena tai lasisena pellettinä. Vanhoissa umpilähteissä sekä suurja aktiivisuuspitoisuuksia vaativissa sovelluksissa, kuten verensäteilyttimissä, ^{137}Cs voi olla myös hyvin liukoisena kloridina, mikä nostaa kontaminaatoriskiä vuototapauksissa. Umpilähdekapselin tyypillisin materiaali on austeniittinen ruostumaton teräs, kuten AISI 304L-, 316L- tai 321 -laadut.

Luvuissa 3 ja 4 käsiteltiin kahta tärkeintä umpilähteitä koskevaa standardia sekä umpilähteiden ikääntymiseen liittyviä säädöksiä ja vaatimuksia valituissa maissa. Standardeissa käsitellään umpilähteiden yleisiä vaatimuksia ja luokituksia, umpilähdevalmistajien kapselille suorittamia mekaanisia testejä, tiiviyskokeita niin valmistuksen kuin käytönkin aikana sekä käytön aikaisia pyyhintäkokeita. Eri maiden säädöksiä ja vaatimuksia käsittelevässä luvussa keskityttiin kapselien käytön aikaisiin tiiviyskokeisiin sekä vaatimuksiin umpilähteen käytön jatkamiselle suositellun käyttöiän jälkeen. Suositukset tai vaatimukset umpilähteiden tiiviyskokeiden suoritusväleiksi vaihtelivat jonkin verran pääsääntöisesti 1–2 vuoden välillä. Umpilähteiden käytön jatkamista suositellun käyttöiän ylittymisen jälkeen käsiteltiin eri maiden säädöksissä varsin vähän. Ainoastaan australialaisella viranomaisella oli selvät ohjeet tällaisiin tapauksiin.

Teollisuuden sovelluksissa umpilähdekapseli on pääsääntöisesti hyvin suojattuna mekaaniselta rasitukselta säteilysuojuksen sisällä. Luvussa 5 käsiteltiin umpilähteiden kesävytteen ja käyttöikänsä vaikuttavia tekijöitä. Nämä jaettiin viiteen ryhmään: umpiläh-

dekapselin valmistusviat, mekaaninen rasitus, korroosio, säteilyrasitus ja normaaleista käyttöolosuhteista poikkeava tilanne, tulipalo. Umpilähdekapselit ovat rakenteeltaan melko yksinkertaisia, joten todennäköisimmiksi valmistusvioiksi nostettiin hitsisaumojen laatu ja kapselin pintavirheet. Kapselit eivät tavanomaisen käytön aikana altistu suurille mekaanisille rasituksille, mutta voivat joutua mekaanisen rasituksen kohteiksi tärinän tai kapseleiden kuljetuksen ja käsittelyn takia. Austeniittinen ruostumaton teräs vastustaa hyvin yleistä korroosiota, mutta on altis paikalliselle korroosiolle etenkin happamia tai kloridipitoisia liuoksia sisältävissä ympäristöissä. Työssä on esitelty viisi korroosiomekanismia, joista piste- ja rakokorroosiota voidaan pitää todennäköisimpinä korroosimuotoina umpilähteiden käyttöolosuhteissa. Kloridipitoisessa ympäristössä pistekorrosio voi vaarantaa umpilähdekapselin tiiviyn, etenkin tapahtuessaan hitsisauman läheisyydessä. Teollisuuden umpilähteiden sähkömagneettisen gammasäteilyn ei todettu vaikuttavan heikentävästi ruostumattomaan teräskapseliin, mutta sillä voi olla pieni vaikutus ei-metallisen radioaktiivisen pelletin haurastumiseen ionisaation kautta. Lisäksi luvussa käsiteltiin tulipalon välittömiä ja välillisiä vaikutuksia umpilähdekapseliin.

Kokeellisessa osuudessa tehtiin materiaalikarakterisointitutkimuksia AISI 316L- ja 321-teräslaaduista valmistetuille ”dummy”-umpilähdekapseleille. Tutkimukset liittyivät näytteiden kemialliseen koostumukseen, mikrorakenteeseen, polarisaatiokäyttäytymiseen sekä hitsisaumojen laatuun. AISI 316L -näytteen molybdeenipitoisuus oli standardinmukaista pitoisuutta pienempi. Molybdeeniseostusta käytetään ruostumattomissa teräksissä paikallisen korroosion ehkäisyyn. AISI 316L -näytteen kemiallinen koostumus määriteltiin kuitenkin SEM-EDS-analyysillä, jolla saadaan vain arvio materiaalin kemiallisesta koostumuksesta. Näytteiden SEM-kuvista tutkittiin kromikarbidien esiintymistä hitsisaumojen läheisyydessä ja niitä löydettiin AISI 316L -näytteestä materiaalin perusaineesta hitsisauman läheltä. Kromikarbidien muodostuminen tarkoittaa tavallisesti karbidien viereisten alueiden köyhtymistä kromista, ja näin ollen korroosiolta suojaavan passiivikalvon puutteita. Polarisaatiomittaukset suoritettiin 3,5 m-% NaCl-liuoksessa 40 °C:een lämpötilassa, ja niissä keskimääräiseksi yleisen korroosion korroosionopeudeksi määritettiin AISI 316L -näytteelle 1,0 µm/a ja 321-näytteelle 2,6 µm/a. Umpilähdekapselin seinämänpaksuuden ollessa noin 1 mm, eivät tällaiset korroosionopeudet ole kapseleiden normaalin käyttöiän aikana tiiviyn kannalta oleellisia. Beetalähteissä oleva teräsikkuna on paksuudeltaan huomattavasti kapselin seinämiä ohuempi, joten se voi hieman kasvattaa vuotoriskiä hyvin korrodoivissa olosuhteissa myös umpilähdekapselin normaalin käyttöiän aikana. Umpilähdekapselit eivät kuitenkaan tavanomaisessa käytössään altistu pitkiä aikoja polarisaatiomittauksen kaltaisille olosuhteille. Syklisellä polarisaatiomittauksella suoritettussa paikallisen korroosion tutkimuksessa molemmat näytteet kärsivät testiliuoksessa merkittävästä paikallisesta korroosiosta, kuten kirjallisuusselvityksen perusteella oli odotettavissa. Näytteiden hitsisaumojen NDT-tarkastuksissa ei havaittu poikkeamia kummallakaan tarkastusmenetelmällä. Kemiallisen koostumuksen, kromikarbidien esiintymisen ja polarisaatiomitta-

usten perusteella vahvistettiin umpilähdekapselien mahdollinen alttius paikalliselle korroosiolle.

Lopuksi kirjallisen ja kokeellisen selvityksen perusteella annettiin suosituksia suositellun käyttöiän ylittäneiden umpilähdekapselien valvonnan kehittämiseen ja mahdollisten riskikohteiden tunnistamiseen säteilylähderakisterissä. Todettiin, että mikäli umpilähdettä on käytetty sen suunnitellussa sovelluksessa ja käyttöympäristössä, voitaisiin lähteen käyttöä suositellun käyttöiän täytyttyä jatkaa, jos kapseli todetaan tiiviyskokeella ja silmämääräisellä tarkastuksella edelleen tiiviiksi ja käyttökelpoiseksi. Umpilähteen käyttöä jatkettaessa suositeltiin, että luvanhaltija selvittäisi Säteilyturvakeskukselle asioita umpilähteen käyttöolosuhteiden korrodoivuuteen ja umpilähteiden käsittelyyn liittyen. Umpilähdekapselille suositeltiin tarkastusta ennen käytön jatkamista suositellun käyttöiän ylityttyä. Tämä tarkastus on luvanhaltijan vastuulla. Tarkastuksessa tulisi kiinnittää erityistä huomiota kapselin pinnan tarkastukseen, erityisesti hitsisaumojen läheisyydessä, sekä tiiviyskokeeseen. Suositellun käyttöiän ylittäneille umpilähteille suositeltiin tavallista tiheämpää pyyhintäkokeiden testiväliä, mutta ehdotettiin testivälin asettamista kontaminaatioriskiä vaikuttavien tekijöiden perusteella.

Umpilähteille tunnistettiin kolme riskitekijää, joiden perusteella mahdollisia riskikohteita voisi säteilylähderakisteristä etsiä. ^{137}Cs -umpilähteitä, joiden sertifikaateissa ei ole tietoa radioaktiivisen aineen kemiallisesta muodosta, voidaan pitää korkeamman riskin kohteina, sillä vanhojen ^{137}Cs -lähteiden sisältämä $^{137}\text{CsCl}$ on hyvin liukoista ja helposti leviävää. Umpilähteen käyttöympäristön kosteus ja runsas happamien tai kloridipitoisten kemikaalien käyttö lisää umpilähdekapselin paikallisen korroosion alttiutta ja sitä myötä kasvattaa vuotoriskiä. Kolmas umpilähdekapselin vuotoriskiä kasvattava tekijä on joissakin umpilähdekapselissa oleva ikkuna, joka voi heikentää kapselin mekaanisia ominaisuuksia sekä korroosio-ominaisuuksia.

LÄHTEET

- [1] O. Pukkila, Säteilyn käyttö, Säteily- ja ydinturvallisuus 3, Säteilyturvakeskus, Hämeenlinna, 2004, 361 p.
- [2] Luvissa olevat umpilähteet, Säteilyturvakeskus, Helsinki, valvontajärjestelmän tuottama raportti, 2017.
- [3] Committee on Radiation Source Use and Replacement, National Research Council, Radiation Source Use and Replacement: Abbreviated Version, National Academies Press, Washington, D.C, 2008, 220 p.
- [4] J.M. Seay, F.W. Moore, Remote Fabrication of ¹³⁷Cesium Sources at Hanford, The U.S. Department of Energy, Richland, Washington, 1992, 10 p. Available: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/24/044/24044881.pdf.
- [5] Cesium (Cs-137), QSA Global, web page. Available (accessed 7.11.2016): <http://www.qsa-global.com/cesium-137/>.
- [6] M.G. Shilton, M.W. Vose, Advanced Radioisotope Sources - Design for Safety and Performance, QSA Global Inc, web page. Available (accessed 11.1.2017): <http://www.slideshare.net/MarkVose1/qsard1301-arps-finala4-keynote-mark-shilton-editor-vers4>.
- [7] International Atomic Energy Agency, Identification of Radioactive Sources and Devices, IAEA Nuclear Security Series No.5, IAEA, Vienna, 2011, 138 p.
- [8] Hyvä tietää säteilystä, Energiateollisuus ry, web page. Available (accessed 20.9.2016): http://energia.fi/sites/default/files/hyva_tietaa_sateilysta_lr_130808.pdf.
- [9] BS EN 10088-1:2005, Stainless steels — Part 1: List of stainless steels, British Standard, London, 2005, 38 p.
- [10] Superalloys Developed by SPS Technologies for Aerospace Fasteners, SPS Technologies, web page. Available (accessed 7.11.2016): http://www.spstech.com/web/user_content/spstech/jenkintown/superalloy_brochure.pdf.
- [11] Handbook of Stainless Steel, Outokumpu Oyj, Sandvikens Tryckeri AB, Sweden, 2013, 90 p.
- [12] J.R. Davis, Alloy Digest Sourcebook: Stainless Steels, ASM International, Materials Park, Ohio, 2000, 584 p.
- [13] Guidelines For Gas Tungsten Arc Welding (GTAW), Miller Electric Mfg. Co., Appleton, USA, 2013, 21 p.
- [14] R. Singh, Laser Welding, Indian Institute of Technology Bombay, web page. Available (accessed 21.11.2016): <http://www.webventuresofny.com/weldguru/laser-beam-welding.pdf>.

[15] Laser Welding, The Welding Institute, web page. Available (accessed 21.11.2016): <http://www.twi-global.com/capabilities/joining-technologies/lasers/laser-welding/>.

[16] Shielding Containers, Berthold Technologies GmbH & Co. KG, web page. Available (accessed 7.11.2016): <https://www.berthold.com/en/pc/shielding-containers>.

[17] CR Series of Shielding Containers, Berthold Technologies GmbH & Co. KG, web page. Available (accessed 7.11.2016): https://www.berthold.com/en/system/asset/shielding_container_lb7440_e.pdf.

[18] Radiometrinen pintakytin, Tecalemit Flow Oy, web page. Available (accessed 3.11.2016): www.tecalemitflow.fi/Download/23552/LB471_ME_FI_R2_2013.pdf.

[19] SFS-EN ISO 2919, Radiological protection. Sealed radioactive sources. General requirements and classification (ISO 2919:2012), Suomen Standardisoimisliitto, Helsinki, 2014, 19 p.

[20] ISO 9978, Radiation protection. Sealed radioactive sources. Leakage test methods, International Organization for Standardization, Geneva, 1992, 10 p.

[21] ST 5.1, Umpilähteiden ja niitä sisältävien laitteiden säteilyturvallisuus, Säteilyturvakeskus, Helsinki, 2016, 16 p.

[22] Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter om användning av industriutrustningar som innehåller slutna strålkällor eller röntgenrör, SSMFS 2008:40, 2009. Available: <http://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/Publikationer/Forfattning/SSMFS-2008/SSMFS-200840/>.

[23] The Swedish Radiation Safety Authority's Regulations on the Control of High-Activity Sealed Radioactive Sources, SSMFS 2008:9, 2009. Available: <http://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/Publikationer/Forfattning/SSMFS-Engelska/2008/SSMFS-20089-The-Swedish-Radiation-Safety-Authoritys-Regulations-on-the-Control-of-High-Activity-Sealed-Radioactive-Sources/>.

[24] The Ionising Radiations Regulations 1999, SI 1999/3232, 1999. Available: <http://www.hse.gov.uk/pUbns/priced/1121.pdf>.

[25] Nuclear Substances and Radiation Devices Regulations, SOR/2000-207, 2000. Available: <http://laws.justice.gc.ca/PDF/SOR-2000-207.pdf>.

[26] Consolidated Guidance About Materials Licenses - Program-Specific Guidance About Fixed Gauge Licenses, United States Nuclear Regulatory Commission, 2016, 175 p.

[27] Wipe Testing of Sealed Sources & Use of Sealed Sources Beyond Recommended Working Life, Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency, 2013, 5 p.

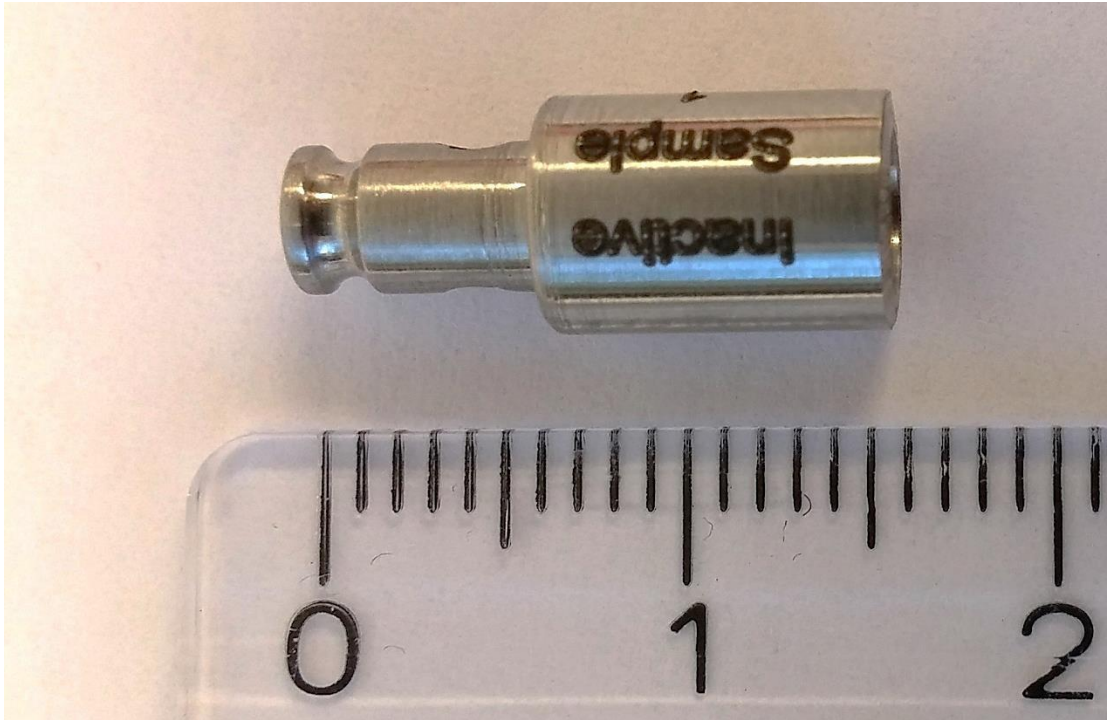
[28] J. Lukkari, Hitsien laatu ja hitsausvirheet, Hitsausuutiset, No. 1/2001, 2001, pp. 10-12.

- [29] Basic Understanding of Weld Corrosion, in: J.R. Davis (ed.), Corrosion of Weldments, ASM International, Materials Park, Ohio, 2006, pp. 1-12.
- [30] Hitsauksen teoriaopetus - B3 Terästen hitsattavuus, Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys ry., web page. Available (accessed 12.12.2016): <http://mandata.pp.fi/Hitsaus/Artikkelit/B3.pdf>.
- [31] A.H. Tuthill, R.E. Avery, Specifying Stainless Steel Surface Treatments, Nickel Institute, web page. Available (accessed 20.12.2016): https://www.nickelinstitute.org/~media/Files/TechnicalLiterature/SpecifyingStainlessSteelSurfaceTreatments_10068_.ashx.
- [32] Korroosionesto: Esiintymismuodot, Opetushallitus, web page. Available (accessed 21.12.2016): http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/mekaniikka_f2_korroosionesto_esiintymismuodot.html.
- [33] Fatigue properties and endurance limits of stainless steels, British Stainless Steel Association, web page. Available (accessed 20.12.2016): <http://www.bssa.org.uk/topics.php?article=104>.
- [34] Corrosion resistance, Outokumpu, web page. Available (accessed 23.12.2016): <http://www.outokumpu.com/en/products-properties/more-stainless/corrosion-resistance/pages/default.aspx>.
- [35] A. Kyröläinen, Ruostumattomat teräkset, in: P.J. Tunturi (ed.), Korroosiokäsikirja, Suomen Korroosioyhdistys, Helsinki, 1988, pp. 455-487.
- [36] P. Siitonen, Passivaatio ja korroosion ilmenemismuodot, in: P.J. Tunturi (ed.), Korroosiokäsikirja, Suomen Korroosioyhdistys, Helsinki, 1988, pp. 90-125.
- [37] A. Nikula, Korroosion torjuntakeinoja korroosion estämiseksi esiintymismuodoittain, in: P.J. Tunturi (ed.), Korroosiokäsikirja, Suomen Korroosioyhdistys, Helsinki, 1988, pp. 165-220.
- [38] S. Kou, Welding Metallurgy, 2nd ed. John Wiley & Sons, New Jersey, 2003, 466 p.
- [39] Ruostumattomat teräkset ja niiden hitsaus, Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys ry., web page. Available (accessed 31.1.2017): <http://mandata.pp.fi/Hitsaus/Artikkelit/PSS.pdf>.
- [40] A. Rolle, B. Droste, Safety During Whole Lifetime - An Important Aspect in Safety Assessment of Sealed Radioactive Sources, 15th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials (PATRAM 2007), Miami, Florida, USA, October 21-26, 2007, Institute of Nuclear Materials Management, Red Hook, NY, pp. 1875-1881.

- [41] Z. Ahmad, Chapter 4 - Types of Corrosion: Materials and Environments, in: Z. Ahmad (ed.), *Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control*, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2006, pp. 120-270.
- [42] Corrosion and Corrosion Properties of Stainless Steels: Part Two, Key to Metals AG, web page. Available (accessed 4.4.2017):
<http://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&LN=EN&NM=235>.
- [43] Corrosion Fatigue, Key to Metals AG, web page. Available (accessed 13.2.2017):
<http://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=441>.
- [44] M.-. Bé, V. Chisté, C. Dullieu, E. Browne, C. Baglin, V. Chechev, N. Kuzmenko, R. Helmer, F. Kondev, D. MacMahon, K.B. Lee, *Table of Radionuclides*, Monographie BIPM-5 3, Bureau International des Poids et Mesures, Sèvres, France, 2006, 235 p. Available:
http://www.bipm.org/utils/common/pdf/monographieRI/Monographie_BIPM-5_Tables_Vol3.pdf.
- [45] G.S. Was, *Fundamentals of Radiation Materials Science : Metals and Alloys*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, 2007, 827 p.
- [46] R.M. Sabu, *Imperfections in Solids – Stoichiometric and Impurity Defects*, Amazing solids, web page. Available (accessed 31.3.2017):
<https://amazingsolids.wordpress.com/2013/06/15/imperfections-in-solids-stoichiometric-and-impurity-defects/>.
- [47] D.W. Shoesmith, F. King, *The Effects of Gamma Radiation on the Corrosion of Candidate Materials for the Fabrication of Nuclear Waste Packages*, AECL-11999, Atomic Energy of Canada Limited, Pinawa, Canada, 1999, 51 p. Available:
http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/31/030/31030414.pdf.
- [48] J.T. Allen, G. Atkinson, A.M. Thyer, *Release Fractions for Radioactive Sources in Fires*, HSL Reports FS/99/19, Health and Safety Laboratory, Harpur Hill, Buxton, 2000, 27 p. Available: http://www.hse.gov.uk/research/hsl_pdf/2002/fractrad.pdf.
- [49] EN 1993-1-2:2005, *Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design*, European Committee for Standardization, Brussels, 2005, 81 p.
- [50] *High-Temperature Characteristics of Stainless Steels*, A Designers' Handbook Series 9004, American Iron and Steel Institute, 47 p. Available:
https://www.nickelinstitute.org/~Media/Files/TechnicalLiterature/High_TemperatureCharacteristicsOfStainlessSteel_9004_.pdf.
- [51] C. Hsieh, W. Wu, *Overview of Intermetallic Sigma (σ) Phase Precipitation in Stainless Steels*, ISRN Metallurgy, Vol. 2012, No. Article ID 732471, 2012, pp. 16. Available (accessed 27.2.2017): <https://www.hindawi.com/journals/isrn/2012/732471/>.

- [52] A. Kosmac, *Stainless Steels at High Temperatures*, Materials and Applications Series 18, Euro Inox, Brussels, 2012, 40 p. Available: http://www.bssa.org.uk/cms/File/StainlessSteels_at_HighTemperatures_EN.pdf.
- [53] *Sealed Radiation Sources - Product Information*, Eckert & Ziegler Nuclitec GmbH, 07/2009, 62 p.
- [54] *Metallien analytiikka*, OES, VTT Expert Services Oy, web page. Available (accessed 1.3.2017): <http://www.vttexpertservices.fi/palvelut/testaus-ja-tarkastus/rakentamisen-tuoteet-ja-materiaalit/rakennusmateriaalien-testaus/metallien-analytiikka>.
- [55] *What is Optical Emission Spectroscopy (OES)?* Oxford Instruments plc, web page. Available (accessed 1.3.2017): <http://www.the-experts.com/optical-emission-spectroscopy-oes-explained>.
- [56] *Principle of Optical Emission Spectrometry*, Shimadzu Corporation, web page. Available (accessed 10.4.2017): <http://www.shimadzu.com/an/elemental/oes/oes.html>.
- [57] T. Lepistö, *Pyyhkäisyelektronimikroskopia ja mikroanalysointi*, Tampereen teknillinen yliopisto - Materiaaliopin laitos, Tampere, 2016, 303 p.
- [58] P. Siitonen, *Korroosiotutkimusmenetelmät laboratorio-olosuhteissa*, in: P.J. Tunturi (ed.), *Korroosiokäsikirja*, Suomen korroosioyhdistys, Helsinki, 1988, pp. 842-858.
- [59] SFS-EN ISO 17475, *Corrosion of metals and alloys. Electrochemical test methods. Guidelines for conducting potentiostatic and potentiodynamic polarization measurements*, Suomen Standardisoimisliitto SFS, Helsinki, 2008, 28 p.
- [60] J. Worman, *Liquid Penetrant Examination*, The National Board of Boiler and Pressure Vessel Inspectors, web page. Available (accessed 7.3.2017): <http://www.nationalboard.org/Index.aspx?pageID=164&ID=374>.
- [61] J.S. Borucki, *Liquid Penetrant Inspection*, in: *Nondestructive Evaluation and Quality Control*, Vol 17, ASM Handbook, ASM International, Materials Park, Ohio, 1989, pp. 71-88.
- [62] *Hitsauksen teoriaopetus - B8 Tarkastus ja testaus*, Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys ry., web page. Available (accessed 8.3.2017): <http://mandata.pp.fi/Hitsaus/Artikkelit/B8.pdf>.
- [63] *Radiographic Inspection*, in: *ASM Handbook* (ed.), *Nondestructive Evaluation and Quality Control*, Vol 17, ASM Handbook, ASM International, Materials Park, Ohio, 1989, pp. 295-357.
- [64] SFS-EN ISO 17636-1, *Non-destructive testing of welds - Radiographic testing - Part 1: X- and gamma-ray techniques with film*, Suomen Standardisoimisliitto SFS, Helsinki, 2013, 44 p.

[65] ASTM E112-12, Standard Test Methods for Determining Average Grain Size, ASTM International, West Conshohocken, 2013, 27 p.

LIITE A: AISI 316L –KAPSELIN KUVAT

Kuva 36. AISI 316L -kapseli, korkeus



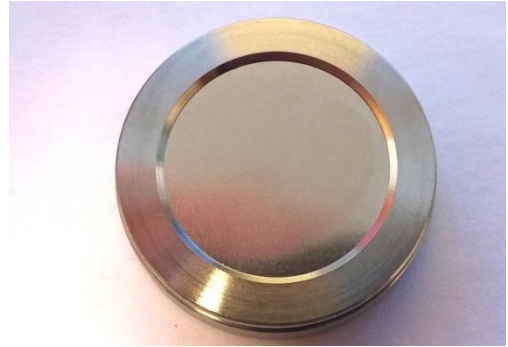
Kuva 37. AISI 316L -kapseli, leveys



Kuva 38. AISI 316L -kapseli, pohja

LIITE B: AISI 321 –KAPSELIN KUVAT

Kuva 39. AISI 321 –kapseli, sivu



Kuva 40. AISI 321 –kapseli, pohja



Kuva 41. AISI 321 –kapseli, kannen hitsisauma



Kuva 42. AISI 321 –kapseli, pohjan hitsisauma

2101

Material study of AISI 316L and AISI 321 samples

Requested by: STUK, Säteilyturvakeskus
Milla Korhonen

Requested by STUK
Säteilyturvakeskus
Milla Korhonen

Order #1678435

Contact person VTT Expert Services Ltd
Mia Liimatainen
Biologinkuja 7, Espoo
P.O. BOX 1001
Tel. +358 40 6375208
Email mia.liimatainen@vtt.fi

Assignment Material study of AISI 316L and AISI 321 samples

Sample -Five empty sealed source capsules of steel AISI 316L (gamma)
-Five empty sealed source capsules of steel AISI 321 (beta)

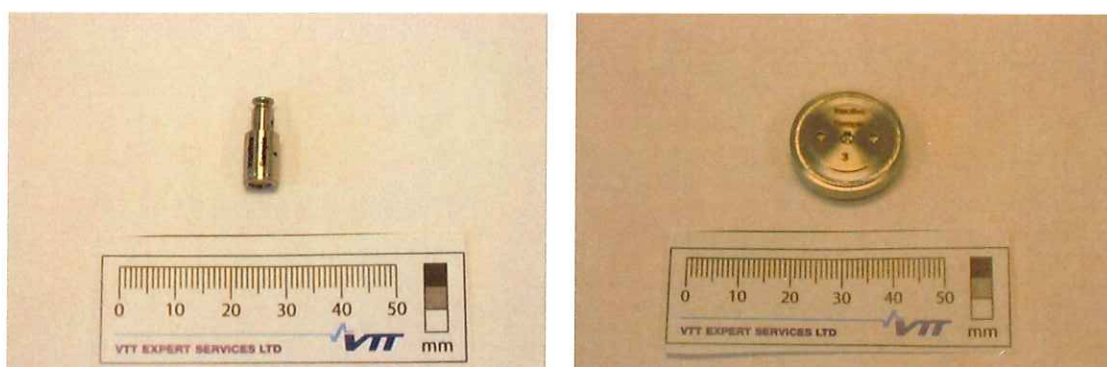


Figure 1: Studied samples gamma (left) and beta (right).

Methods and Results *Chemical compositions of the steel samples*

The chemical compositions of the steel samples were defined by Optical Emission Spectroscopy (OES). In Table 1 composition of the sample beta is shown. Additionally requirements stated in standard SFS-EN 10088 for grade AISI 321 are presented.

Table 1: Composition of the sample beta.

Sample	Chemical composition %															
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	W	V	Ti	Co	Nb	Fe
beta	0,016	0,36	1,86	0,026	0,028	16,7	8,81	0,36	0,46	0,005	0,03	0,07	0,09	0,15	<0,01	(rest)
AISI 321	max 0,08	max 1,00	max 2,00	max 0,015	max 0,045	17,00-19,00	9,00-12,00	-	-	-	-	-	5 x C... 0,70	-	-	rest

The test results relate only to the sample tested.

According to the results the chrome (Cr) and nickel (Ni) compositions of the beta steel sample are slightly below the requirements for steel grade AISI 321 stated in standard SFS-EN 10088-1.

Composition of sample gamma could not be reliable defined due to the small sample size. Composition of the gamma sample was measured by SEM with X-ray microanalysis (SEM-EDS). Characteristic X-rays that are produced by the interaction of electrons with the sample may also be detected in an SEM equipped with EDS. EDS can provide rapid qualitative and also quantitative analysis of elemental composition of the sample. It can detect carbon (C) and elements heavier than that. Lighter elements and elements less than 0.5% are not necessarily detected in the analysis. Analysis was conducted from a surface that was polished. From quantitative EDS analysis carbon (C) and oxygen (O) are excluded. It must be taken into account that the quantitative EDS analysis is an estimate of the amounts of the elements.

Table 2: EDS analysis results of gamma source.

Sample	Chemical composition %									
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	N	Fe
gamma	excluded	0,5	2,5	-	-	17,9	9,5	0,4	-	(rest)
AISI 316L	max 0,030	max 1,00	max 2,00	max 0,015	max 0,045	16,50-18,50	10,00-13,00	2,00-2,50	max 0,10	rest

According to the EDS analysis results, molybdenum concentration of the studied gamma source is smaller compared to the requirements for material grade AISI 316L.

Microstructures of studied samples

Cross section samples of the steel samples were manufactured by mounting, polishing and etching for microstructure study. The samples were studied by optical microscope and scanning electron microscopy (SEM). SEM is a microscope that uses electrons instead of light to form an image. SEM produces images by scanning the sample with a high-energy beam of electrons.

In Figure 2 an optical image of the microstructure of the beta sample is presented near the weldment.

The test results relate only to the sample tested.

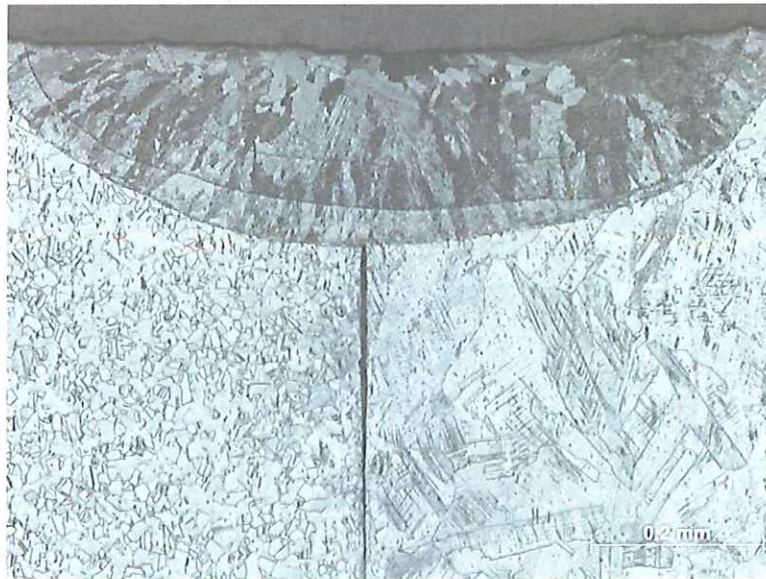


Figure 2: Optical image of the microstructure of the beta sample near the weldment.

It can be noticed that the microstructures of the welded parts are different. In Figures 3 (left side of Fig. 2) and 4 (right side of Fig. 2) microstructures of the beta source sample are shown.

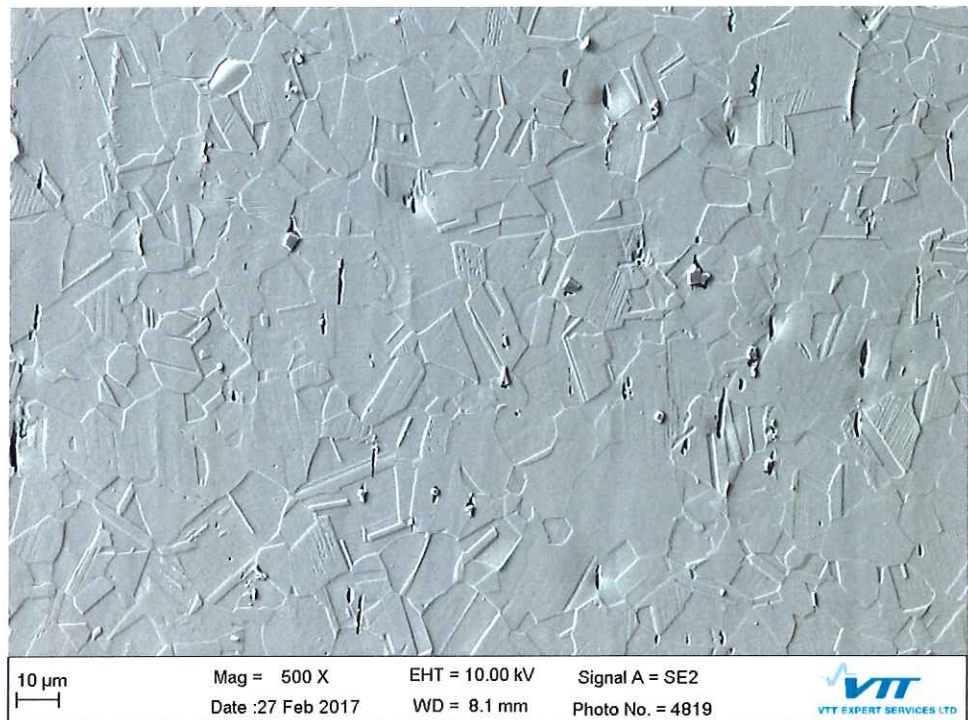


Figure 3: Microstructure of the beta source sample.

The test results relate only to the sample tested.



Figure 4: Microstructure of the beta source sample.

Microstructure of beta source sample is austenite. Yet, microstructure shown in Figure 4 consists of larger grains.

In Figure 5 an optical image of the microstructure of the gamma sample is presented.

The test results relate only to the sample tested.



Figure 5: Optical image of the microstructure of the gamma sample.

In Figure 6 microstructure of the gamma source sample is shown.

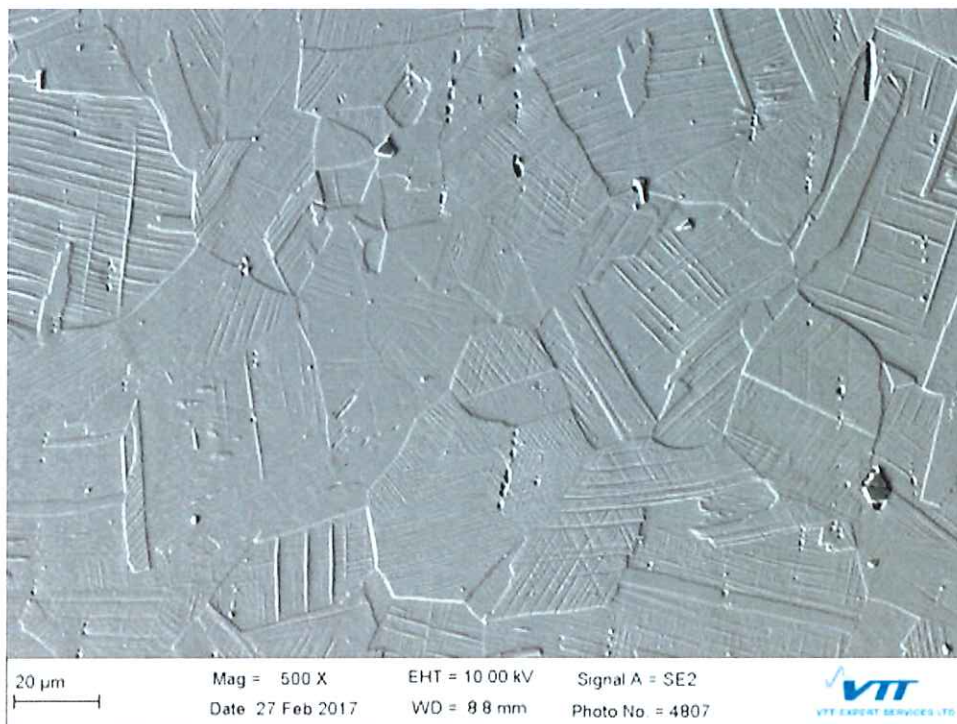


Figure 6: Microstructure of the gamma source sample.

Microstructure of gamma source sample consists of austenite.

The test results relate only to the sample tested.

SEM study of the weld areas

The weld areas and the formation of chromium carbides in the heat affected zone (HAZ) were studied from cross section samples by SEM.

In Figures 7-10 SEM images at the weld areas of gamma sample are shown.

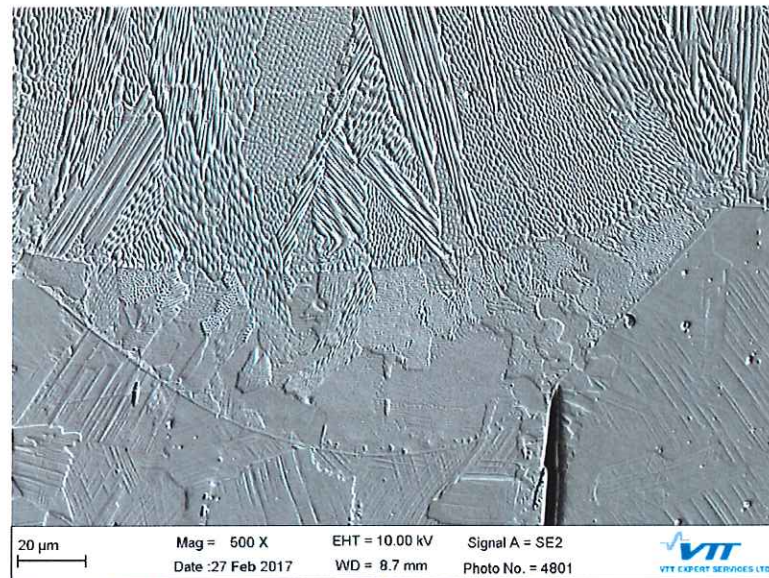


Figure 7: SEM image of gamma sample near the welded area.

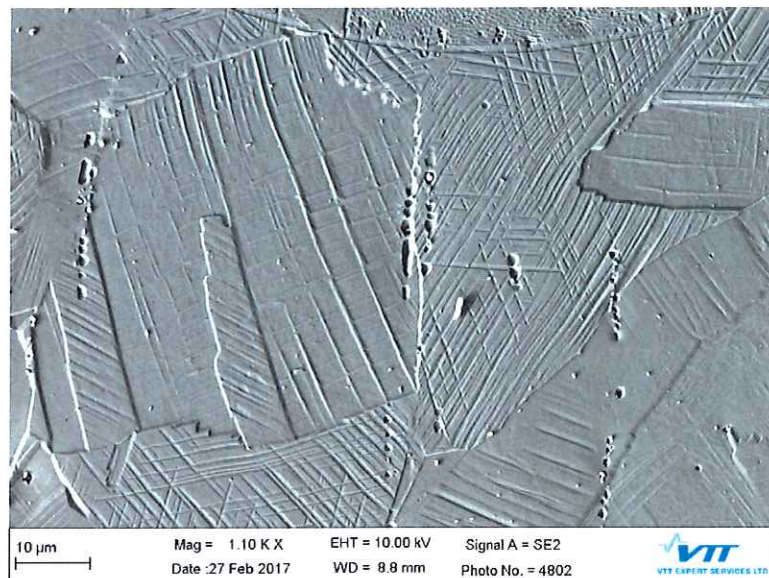


Figure 8: SEM image of gamma sample near the welded area.

The test results relate only to the sample tested.

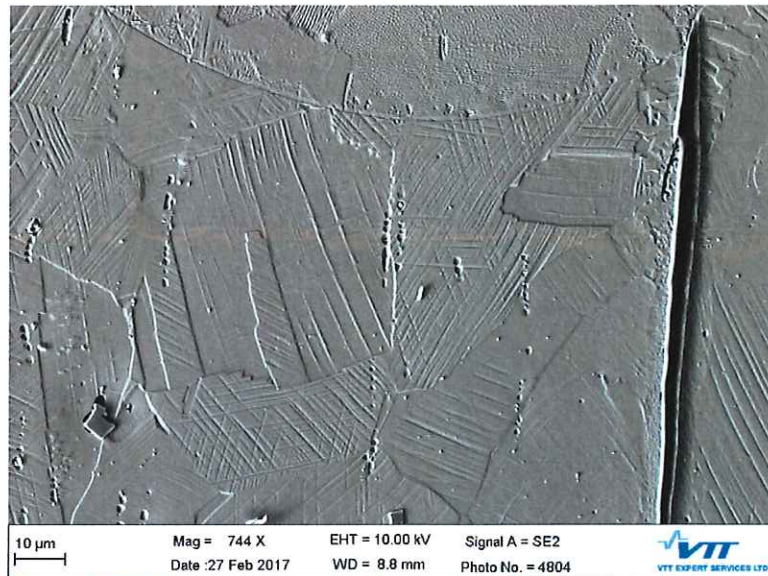


Figure 9: SEM image of gamma sample near the welded area.

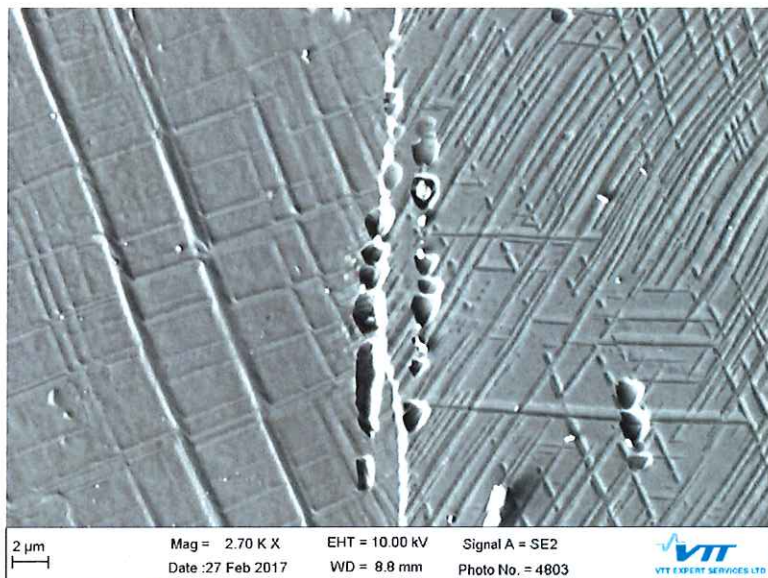


Figure 10: SEM image of gamma sample near the welded area.

According to SEM observations chromium carbides were found at the base material of the stainless steel.

Crack was found at the weldment of gamma sample. This is presented in Figures 11 and 12.

The test results relate only to the sample tested.



Figure 11: Weldment of gamma sample, from which cracking was found. Crack indicated.

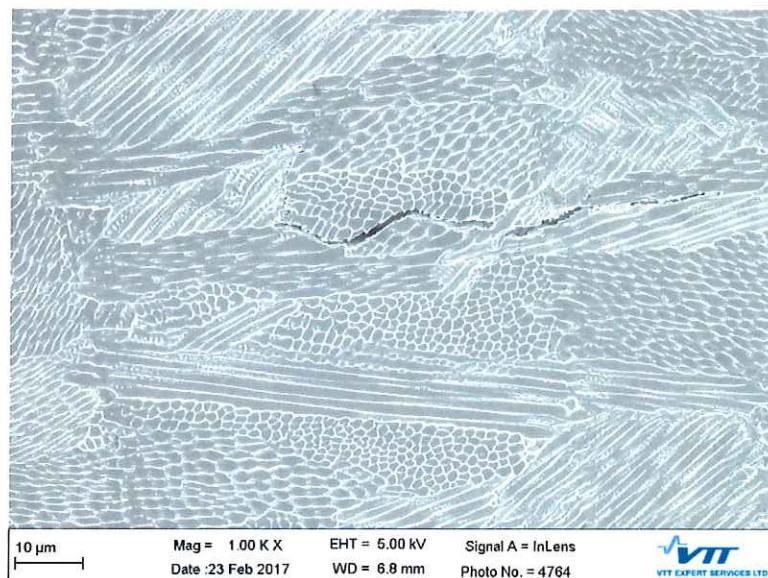


Figure 12: Weldment of gamma sample, from which cracking was found.

In Figures 13-15 SEM images at the weld areas of beta sample are shown.

The test results relate only to the sample tested.

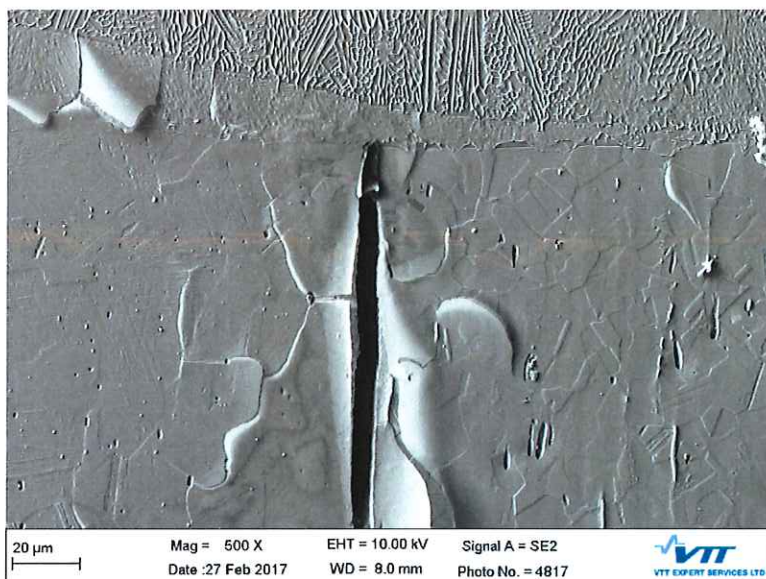


Figure 13: SEM image of beta sample near the welded area.

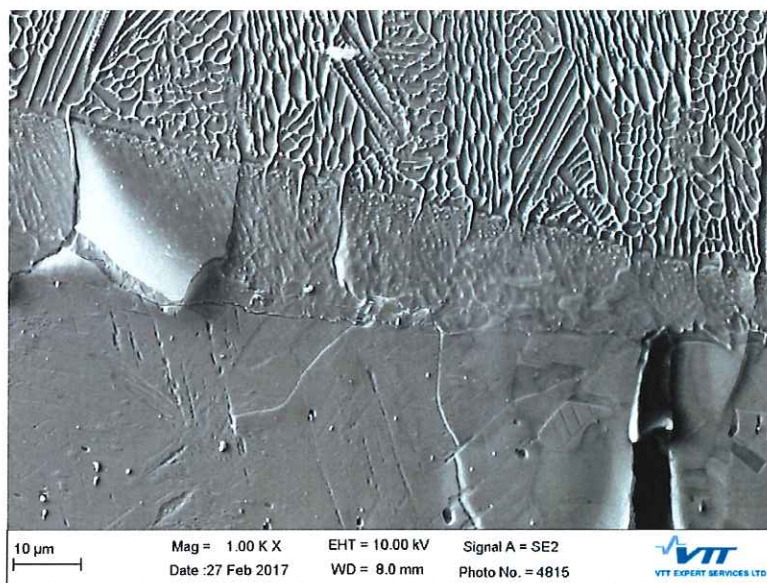


Figure 14: SEM image of beta sample near the welded area.

Scaling observed in Figures 12 and 13 is scaling of the carbon coating.

The test results relate only to the sample tested.

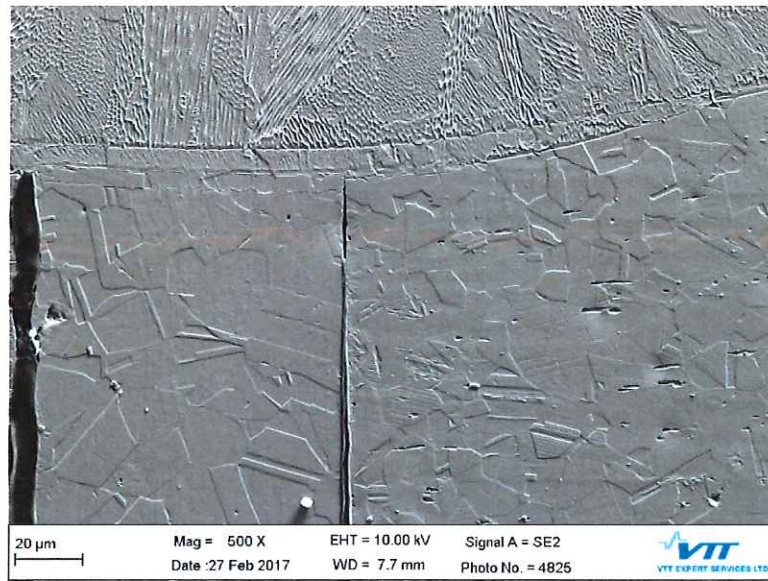


Figure 15: SEM image of beta sample near the welded area.

In beta samples no chromium carbides were observed near the weld area.

Average grain sizes of the samples

Average grain sizes of the samples were defined by Average Grain Intercept method. Lines were drawn across the samples and the measures of the lines (l) were noted. The number of grain boundary intercepts was counted (n), and the grain size (d) was defined. Average grain size was defined as:

$$d = \frac{l}{n}$$

Average grain size was measured in both y- and x –directions. In Figure 16 an example of the grain size measurement in x-direction is shown.

x

The test results relate only to the sample tested.

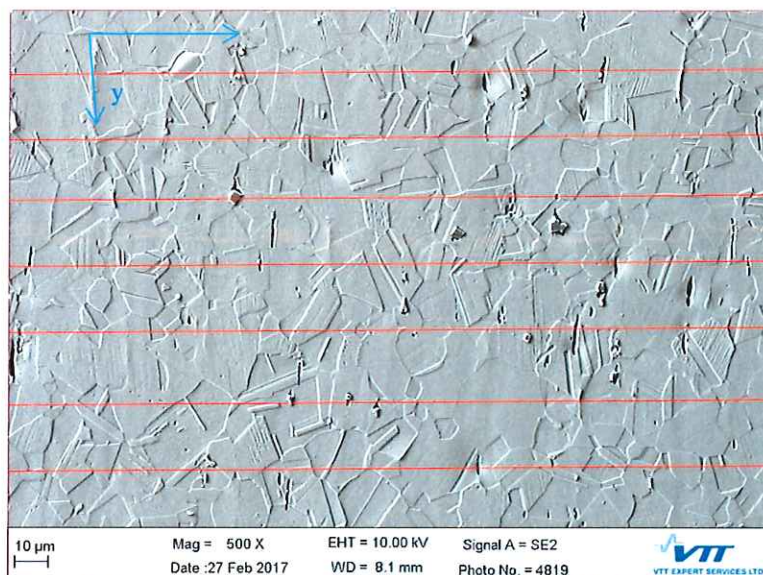


Figure 16: An example of the grain size measurement in x-direction.

In Table 3 average grain sizes in x and y –directions are presented. Grain structure of beta sample was defined from part presented in Fig. 3.

Table 3: average grain sizes in x and y –directions.

Sample	Average grain size in x-direction [µm]	Average grain size in y-direction [µm]
beta	12	13
gamma	50	58

NDT analysis of the weldments

Liquid penetrant inspection and radiographic inspection were conducted to the weld areas of the samples.

Find NDT inspection reports attached; attachment 1.

Corrosion rate measurements

Electrochemical corrosion measurements were carried out in solution with 3.5 wt-% NaCl in tap water. This salinity corresponds to salinity of an ocean. Experiments were done at temperature of 40 °C in a three-electrode cell and a magnetic stirrer was used. Stainless steel samples were as working electrodes, counter electrode was a carbon bar and as a reference electrode an Ag/AgCl electrode was used.

Samples shown in Figure 17 were prepared from gamma and beta samples by clamping a coated copper wire to the samples and moulding these into epoxy. The whole surface of the gamma sample shown in Figure 17a) was used as measuring area. For the beta sample only the ring between the inner and outer circle was

The test results relate only to the sample tested.

utilized, and the middle section was coated by epoxy (Figure 17b). Before experiments the samples surfaces were ground to 1200 grid.



a) Gamma sample.

b) Beta sample.

Figure 17: Samples after slow cyclic polarization experiments.

Uniform corrosion rates of samples were measured using Tafel method and the tendency for local corrosion (pitting and crevice corrosion) by cyclic anodic polarization measurements at scanning speed of 10 mV/min.

Before polarization the sample in Tafel test was stabilized 30 min in the solution. Polarization was started at potential 150 mV more negative than the corrosion potential and the sample was polarized 300 mV to anodic direction at scanning speed of 10 mV/min. Corrosion rates were calculated based on the slopes measured.

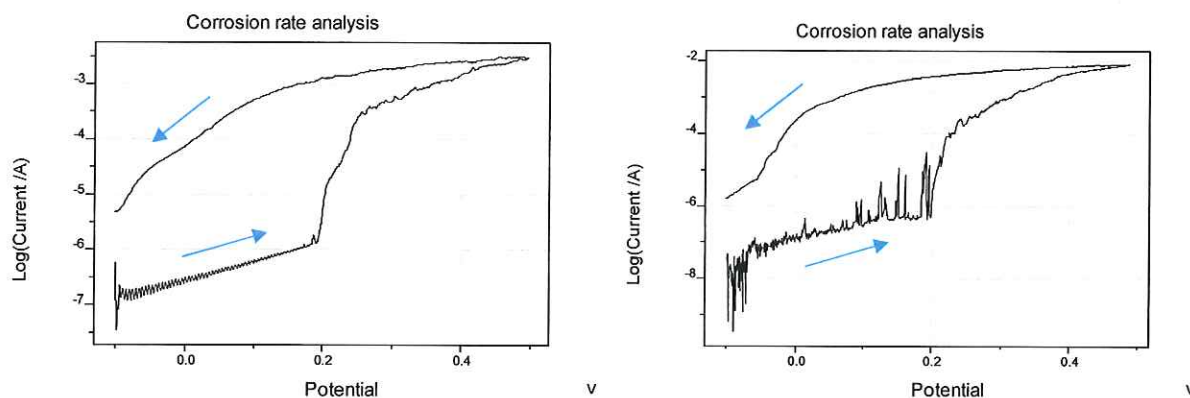
The average corrosion rate of gamma sample based on three separate measurements is 1.0 $\mu\text{m/a}$ and that of beta sample 2.6 $\mu\text{m/a}$ (Table 4). The graphs of the experiments are illustrated in Appendix 2.

Table 4: Corrosion rates of stainless steels AISI 316L and 321 in 3.5 % NaCl solution.

	Corrosion rate / $\mu\text{m/a}$			
Test	1	2	3	Average
gamma	1,6	0,79	0,67	1,0
beta	2,4	2,8	2,7	2,6

Cyclic polarization measurements were started after 30 min stabilization at potential 100 more negative than the corrosion potential and the sample was polarized at scanning rate of 10 mV/min to potential about +500 mV where the scan was reversed (Figure 18). The reverse did not occur at the same current density, but the large area between anodic and cathodic polarization for both material clearly shows that both material suffer severe local corrosion in the test solution. Both pitting and crevice corrosion was found on the surface of the samples. Crevice corrosion has initiates in the boundary between the metal and epoxy.

The test results relate only to the sample tested.



a) Gamma.

b) Beta.

Figure 18: Results of cyclic polarization measurements at scanning rate of 10 mV/min.

The uniform corrosion rate of beta sample in 3.5 w-% NaCl solution is slightly higher than that of gamma sample.

Both materials suffer severe local corrosion in the test solution. Based on the measurements carried out, no difference in the resistance of local corrosion can be estimated.

Espoo, 28.2.2017


Marja Tuominen
Business Manager


Mia Liimatainen
Expert

Distribution

Customer
Archive

Original
Original

The test results relate only to the sample tested.